



TU Clausthal

**Planerische Bestimmung von Randbedingungen
zur Steuerung von Blindleistungsquellen an
Knoten von Mittelspannungsnetzen**

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

M.Sc. Matthias Reinhard Haslbeck

aus Regensburg

(Geburtsort)

genehmigt von der Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Clausthal,

Tag der mündlichen Prüfung

19.02.2020

Dekanin/Dekan:

Prof. Dr. rer. nat. habil. Bernd Lehmann

falls abweichend: Vorsitzende/Vorsitzender der Promotionskommission:

Prof. Dr. Roland Menges

Betreuer/Erstgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck (Technische Universität Clausthal)

Zweitgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Oliver Brückl (Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg)

meiner Familie
Ines, Anna und Sophia

Kurzfassung

Diese Arbeit stellt ein Verfahren zur planerischen Bestimmung von Randbedingungen zur Steuerung von Blindleistungsquellen mit Anschlusspunkt in der Mittelspannungsebene zum Ausgleich der Blindleistungsbilanz einzelner Mittelspannungsnetze vor. Es beruht auf einer analytischen Bewertung des Netzes, bei der Spannungs- und Stromrestriktionen berücksichtigt werden. Das Steuerungsverfahren unterscheidet sich von anderen Modellen vor allem dadurch, dass es Ansätze der Netzplanung verwendet und keine reine Zustandsoptimierung (Regelungsansatz) des Netzbetriebs beschreibt. Der entwickelte Algorithmus ermöglicht den gleichzeitigen Abruf von Blindleistung aus mehreren Blindleistungsquellen mit Anschlusspunkt in der Mittelspannungsebene, was bis dato aufgrund der fehlenden Beobachtbarkeit dieser Spannungsebene (kaum Messtechnik) nicht in Erwägung gezogen wird. Zum Einsatz kommt eine differenzierte Betrachtung von entkoppelten Spannungsebenen und Arbeitspunkten der Netzgruppe, um das Blindleistungspotenzial der Quellen bestmöglich auszunutzen. Die Steuerparameter, die die Verteilung und maximale Höhe eines Blindleistungsabrufs beschreiben, werden über eine lineare Optimierung ermittelt. Das Verfahren wird beispielhaft am Blindleistungsquellentyp „Betrieb mit Kompensationsanlage“ mittels Netzsimulationen evaluiert.

Abstract

This work presents a method for the control of reactive power sources with connection point in the medium-voltage level to compensate the reactive power balance of individual medium-voltage networks. It is based on an analytical evaluation of the network where voltage and current constraints are taken into account. The control method differs from other models among others in that it uses network planning approaches and does not describe pure state optimization (regulation approach) of network operation. The developed algorithm enables the simultaneous call-up of reactive power from several reactive power sources with connection point in the medium-voltage level, which has not been considered until now due to the lack of observability of this voltage level (only few measurement equipment). A differentiated consideration of decoupled voltage levels and operating points of the network group is used in order to make the best possible use of the reactive power potential of the sources. The control parameters, which describe the distribution and maximum level of a reactive power demand, are determined via a linear optimization. The method is evaluated by network simulations and use of the source typ „company with compensation system“.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XXI
Abkürzungsverzeichnis	XXIII
Symbolverzeichnis	XXIX
Danksagung	XXXVII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung	3
1.3 Aufbau der Arbeit	6
2 Grundlagen, Einordnung und Abgrenzung der Aufgabenstellung	7
2.1 Begriffsdefinitionen	7
2.2 Diskussion des Ordnungsrahmens und von Regelwerken	14
2.2.1 Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung	14
2.2.2 Niederspannungsanschlussverordnung	18
2.2.3 Technische Anschlussbedingungen	20
2.3 Charakteristiken von Mittelspannungsnetzen	26
2.3.1 Prinzipieller Aufbau von Mittelspannungsnetzen	26
2.3.2 Zusammensetzung des Wirk-Blindleistungshaushalts von Mittelspannungsnetzen	28
2.3.3 Auflistung von Beeinflussungsmöglichkeiten des Blindleistungshaushalts eines Mittelspannungsnetzes	37
2.4 Diskussion relevanter Aspekte der Netzplanung	38
2.4.1 Beschreibung der simulationsgestützten Netzbewertung	40
2.4.2 Randbedingungen der Spannungshaltung	42
2.4.3 Analyse der Randbedingungen der Betriebsmittelbelastung	46

2.4.4	Bewertung von Verstärkungs- und Abschwächungseffekten eines Blindleistungsabrufs	52
2.4.5	Diskussion der Arbeitspunktmodellierung von bezogen auf Netzverknüpfungspunkt (EZA) und Lasten	56
2.5	Beschreibung des Einsatzes und Diskussion des Blindleistungspotenzials von Mittelspannungsbetrieben mit betrieblichen Kompensationsanlagen	59
2.5.1	Aufbau von betrieblichen Kompensationsanlagen	60
2.5.2	Regelung von betrieblichen Kompensationsanlagen	62
2.5.3	Blindleistungspotenzial von betrieblichen Kompensationsanlagen	63
2.6	Zusammenfassung der Aufgabenstellung und der darüber abgeleiteten Anforderungen an ein Steuerungsverfahren für Blindleistungsquellen	64
3	Entwicklung eines Steuerungsverfahrens für Blindleistungsquellen in Mittelspannungsnetzen	69
3.1	Beschreibung des entwickelten Lösungskonzeptes	70
3.1.1	Beschreibung der dezentralen Blindleistungsregelung mit integriertem Steuerungsverfahren für Blindleistungsquellen	70
3.1.2	Blindleistungsquellenmanager	73
3.1.3	Beschreibung des Steuerungsverfahrens für Blindleistungsquellen	74
3.2	Entwicklung der Netz-Sensitivitäts- und -Restriktionsanalyse zur Bestimmung der maximal abrufbaren Blindleistung aus einer Blindleistungsquelle	76
3.2.1	Entwicklung der Netz-Sensitivitätsanalyse für einen Blindleistungsabruf aus einer Blindleistungsquelle	77
3.2.1.1	Grundlagen der Sensitivitätsanalyse	78
3.2.1.2	Modell zur Bewertung der Arbeitspunktabhängigkeit der Sensitivitätswerte	81
3.2.1.3	Analyse der Spannungssensitivität der MS-Ebene	91
3.2.1.4	Analyse der Spannungssensitivität der HS/MS-Ebene	100
3.2.1.5	Analyse der Spannungssensitivität der HS-Ebene	102
3.2.1.6	Analyse der Leistungssensitivität der MS-Ebene .	107
3.2.1.7	Analyse der Leistungssensitivität der HS/MS-Ebene	111

3.2.2	Entwicklung der Netz-Restriktionsanalyse für eine einzelne Blindleistungsquelle	113
3.2.2.1	Grundlagen der Netz-Restriktionsanalyse	114
3.2.2.2	Bestimmung der maximal abrufbaren Blindleistung aus Sicht der Spannungshaltung	118
3.2.2.3	Bestimmung der maximal abrufbaren Blindleistung aus Sicht der Betriebsmittelauslastung	122
3.2.3	Diskussion der Ergebnisse der Netz-Sensitivitäts- und -Restriktionsanalyse hinsichtlich einer Blindleistungsbilanzoptimierung	126
3.2.3.1	Ergebnisse der Netz-Sensitivitäts- und -Restriktionsanalyse im Kontext der Aufgabenstellung	126
3.2.3.2	Zwischenfazit	130
3.3	Entwicklung eines Algorithmus zur Koordination eines dezentralen Blindleistungsabrufs aus mehreren Blindleistungsquellen	131
3.3.1	Funktionsweise des Koordinationsalgorithmus	131
3.3.1.1	Allgemeine Funktionsweise des Koordinationsalgorithmus	132
3.3.1.2	Phasen des Koordinationsalgorithmus	133
3.3.2	Definition von Eingriffsklassen	134
3.3.3	Definition von Worst-Case-Szenarien	138
3.3.4	Umsetzung des Algorithmus zur Abrufkoordination	139
3.3.4.1	Zielfunktion	139
3.3.4.2	Randbedingungen	140
3.3.4.3	Umsetzung	147
3.4	Entwicklung eines Prognosemodells zur Bestimmung des Blindleistungspotenzials von Betrieben	150
3.4.1	Konzeption des Prognosemodells	152
3.4.2	Ermittlung der Prognosefunktion	155
3.4.3	Modellbildung und Evaluierung	160
3.4.4	Evaluierung der Übertragbarkeit der Prognose auf den Netzverknüpfungspunkt von Betrieben	164
3.4.5	Darstellung des Prognosemodells als Blockschaltbild	168
3.4.6	Diskussion der Modellanwendbarkeit	170
3.5	Weiterführende Aspekte	171
3.5.1	Blindleistungsabruf aus Sicht der Netzführung	171
3.5.2	Ausdehnung der Analysen auf weitere Spannungsebenen	173

3.5.3	Einflussbereiche der Blindleistungsquelle	174
3.5.4	Wechselwirkung zwischen Blindleistungsabruf und spannungs- abhängigem Verhalten von Lasten und Erzeugungsanlagen	174
3.5.5	Definition von limitierenden Knoten- und Kantenelementen	177
3.5.6	Datenbasis	177
3.6	Resultierende Thesen	179
4	Evaluierung des Steuerungsverfahrens anhand von Netzsimu- lationen	181
4.1	Beschreibung des verwendeten Netzmodells	181
4.1.1	Netzstruktur	182
4.1.2	Verhalten des Slack-Knotens	183
4.1.3	Nachbildung von Lasten und Einspeisern	183
4.1.4	Wirk-Blindleistungsverhalten der Netzgruppe Stadt_Industrie	184
4.1.5	Betrachtete Blindleistungsquellen	189
4.2	Beschreibung der Szenarien und der Randbedingungen der Simu- lation	193
4.2.1	Blindleistungspotenzial und Blindleistungssollwert	195
4.2.2	Eingriffsklassen	195
4.2.3	Strom- und Spannungsgrenzwerte bzw. -Freiräume	196
4.2.4	Arbeitspunktabhängigkeit der Sensitivitätswerte	197
4.2.5	Blindleistungsabruf	198
4.3	Diskussion der Simulationsergebnisse	200
4.3.1	Unbeeinflusster Zustand der Netzgruppe im Basisjahr	200
4.3.2	Überprüfung der Einhaltung der Netzrestriktionen im Sze- nario S1_1	202
4.3.3	Überprüfung der Einhaltung der Netzrestriktionen im Sze- nario S1_2	207
4.3.4	Potenzialbewertung der bezogen auf MS-Ebene (MS)-Be- triebe mit betrieblichen Kompensationsanlage (BKA) im Szenario S2_1	212
4.4	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse	218
5	Schlusswort	221
5.1	Resumé und Kernaussagen	221
5.2	Praxisbezug	224
5.3	Anschlussfähigkeit	226

A Anhang	227
A.1 Blindleistungsverhalten von Transformatoren und Leitungen . . .	227
A.2 Eckdaten der verwendeten Beispiel-Mittelspannungsnetze	228
A.3 Erläuterung des Netzplanungsprozesses	231
A.4 Blindleistungsverhalten in der MS- und MS/HS-Ebene	233
A.5 Grundlagen der Netz-Sensitivitätsanalyse	237
A.6 Arbeitspunktabhängigkeit der Spannungssensitivität der Knoten- elemente in der MS-Ebene	242
A.7 Arbeitspunktabhängigkeit der Spannungssensitivität am HS/MS- Transformator	249
A.8 Arbeitspunktabhängigkeit der Spannungssensitivität der HS-Ebene	251
A.9 Arbeitspunktabhängigkeit der Leistungssensitivität der Zweigele- mente	251
A.10 Datenbasis für Prognosemodell zur Bestimmung des Blindleistungs- potenzials von Betrieben	253
A.11 Modellbewertung anhand von Ergebnissen des Projektes SyNErgie	253
A.12 Evaluierung des Prognosemodells zur Bestimmung des Blindleis- tungspotenzials von Betrieben	257
A.13 Zeitverhalten der Betrachteten Betriebe	266
A.14 Kennzahlen des Beispielnetzes im unbeeinflussten Zustand	273
A.15 Kennzahlen des Beispielnetzes im Szenario S1_1	279
A.16 Kennzahlen des Beispielnetzes im Szenario S1_2	284
A.17 Kennzahlen des Beispielnetzes im Szenario S2_1	287
Literaturverzeichnis	291

Abbildungsverzeichnis

2.1	Begriffsdefinitionen aus dem Bereich des Stromnetzaufbaus bzw. der Stromnetzsimulation.	11
2.2	Betriebsgrenzendiagramm für Verbraucher mit Anschlusspunkt in der bezogen auf HS-Ebene (HS)-Ebene nach [1].	22
2.3	Wirk-Blindleistungsverhalten von Haushaltsverbrauchern im P -tan φ -Diagramm als Boxplots. Datenbasis bilden die Messdaten von 50 Smart Metern in Form von 1-Minuten-Mittelwerten über einen Zeitraum von knapp einem Jahr aus dem Projekt [2].	30
2.4	Blindleistungsverhalten von typischen HS/MS-Transformatoren unterschiedlicher Bemessungsleistung. Nach [3].	32
2.5	Blindleistungsverhalten von typischen MS-Leitungen; die beiden oberen Linien stehen für zwei unterschiedliche Freileitungstypen, die beiden unteren Linien für zwei verschiedene Kabelversionen. Nach [3].	33
2.6	Wirk-Blindleistungsverhalten eines MS-Netzes mit dominanter PV-Erzeugung (Beispielnetz Land_EZA). Wirk- und Blindleistung sind auf die Bemessungsleistung des HS/MS-Transformators $S_{r \text{ HS/MS-Transformator}}$ normiert, die 40 MVA beträgt. Datenbasis bilden Messwerte eines Netzbetreibers aus dem Projekt [2] in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres (2015).	34
2.7	Wirk-Blindleistungsverhalten eines MS-Netzes mit dominantem MS-Betrieb und EZA-Einspeisung (Beispielnetz Land_Betrieb). Wirk- und Blindleistung sind auf die Bemessungsleistung des HS/MS-Transformators $S_{r \text{ HS/MS-Transformator}}$ normiert, die 40 MVA beträgt. Datenbasis bilden Messwerte eines Netzbetreibers aus dem Projekt [2] in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres (2015).	35

2.8	Wirk-Blindleistungsverhalten eines MS-Netzes mit dominanten MS-Betrieben (Beispielnetz Stadt_Industrie). Wirk- und Blindleistung sind auf die Bemessungsleistung des HS/MS-Transformators $S_{r \text{ HS/MS-Transformator}}$ normiert, die 40 MVA beträgt. Datenbasis bilden Messwerte eines Netzbetreibers aus dem Projekt [2] in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres (2015).	36
2.9	Darstellung der stationären Lastflussberechnung mit Ein- und Ausgangsdaten.	42
2.10	Darstellung des Ersatzschaltbildes für MS- und bezogen auf NS-Ebene (NS)-Ebene inklusive HS/MS-Transformator. Nach [4]. . .	43
2.11	Darstellung des komplexen Spannungsfalls für die Last- und Einspeisesituationen in der MS-, MS/NS- und NS-Ebene. Grafik nach [4].	45
2.12	Darstellung der Scheinleistungsänderung ΔS bezogen auf die Ausgangs-Scheinleistung S_{Start} bei verschiedenen Blindleistungsänderungen ΔQ in Abhängigkeit verschiedener Ausgangs- $\frac{Q}{P}$ -Verhältnisse. Positive Werte sind als Verstärkung, d. h. Zunahme der Scheinleistung, zu verstehen.	48
2.13	Belastungsuntersuchung von Umspannwerktransformatoren (maximale Transformatorauslastung, Heißpunkttemperatur und Lebensdauerverbrauch pro Jahr von unten nach oben), mit Kennzeichnung der realen Arbeitspunkte (gestrichelte Linien mit Punkten) und Arbeitspunkt der annähernd maximal zulässigen Heißpunkttemperatur von 140 % (blaue Kreise, bei industrie-geprägten Netz nicht dargestellt).	51
2.14	Prozentuale Verstärkungs- und Abschwächungseffekte bezogen auf den getätigten Blindleistungsabruf im betrachteten MS-Netz. . . .	54
2.15	Modell zur Bewertung der Verstärkungs- und Abschwächungseffekte über mehrere Spannungsebenen hinweg.	55
2.16	Kombinierte Darstellung der Prozesse „Systemanalyse“ und „Blindleistungsmanagement“ aus [5] in blau, mit in grün dargestellten Schnittstellen bzw. Erweiterungen bezüglich der vorliegenden Arbeit.	68
3.1	Schema der dezentralen Blindleistungsregelung mit dezentral verteilten Blindleistungsquellen. Grafik nach [6].	71

3.2	Einordnung der Kernkomponenten der dezentralen Blindleistungsregelung in Zuständigkeits- und Funktionsbereiche der Blindleistungsquelle und Stromnetzes.	73
3.3	Darstellung des entwickelten Steuerungsverfahrens als Prozess. . .	75
3.4	Darstellung der auf den Blindleistungsabruf normierten Scheinleistungsänderung $\frac{\Delta S}{\Delta Q}$ bei verschiedenen Blindleistungsänderungen ΔQ in Abhängigkeit verschiedener Ausgangs- $\frac{Q}{P}$ -Verhältnisse.	80
3.5	Vereinfachtes Netzmodell zur Bewertung der Betriebspunktabhängigkeit der Sensitivitätswerte.	82
3.6	Äquipotenziallinien des Spannungsniveaus am Ende der Leitung bei verschiedenen Arbeitspunkten und Limitierung der Arbeitspunkte auf einen Bereich zwischen 0,90 p.u. und 1,10 p. u. Die roten Punkte zeigen die ermittelten maximal anschließbaren Wirk- bzw. Blindleistungswerte bei Spannungsgrenzen $U_c + 2\% / - 5\%$. Die gestrichelten roten Linien deuten ein heute typisches Blindleistungsverhalten an.	84
3.7	Interpretation der Spannungssensitivität $\frac{\delta U}{\delta Q}$ anhand der Äquipotenziallinien des Spannungsniveaus (grüne Linien) am Ende einer Leitung bei verschiedenen Arbeitspunkten. Über die rot eingezeichneten Pfeile wird der Verlauf und die Höhe des Gradienten angedeutet.	85
3.8	Spannungsverlauf („Bogenstück“) am Ende einer 20 km langen Freileitung bei einem konstantem Wirkleistungsbezug von 10 % der Nennscheinleistung der Leitung in Abhängigkeit verschiedener Blindleistungsarbeitspunkte. Der graue Zeiger repräsentiert die fest vorgegebene Spannung am Anfang der Leitung. Der grüne Zeiger zeigt die Spannung am Ende der Leitung für einen exemplarischen Arbeitspunkt. Die Kreuze kennzeichnen verschiedene Spannungsbandgrenzen.	86
3.9	Erläuterungsgrafik zur Bestimmung der Arbeitspunktabhängigkeit der Sensitivitätswerte bzw. deren Korrekturfaktoren.	89
3.10	Maximal mögliche Änderung der Spannungssensitivität je MVar bei konstantem P in der MS-Ebene für verschiedene Leitungstypen, Spannungsgrenzen und Blindleistungsbezugswerten.	90

3.11 Äquipotenziallinien des Spannungsniveaus am Ende der MS-Freileitung ($\frac{X}{R} = 1, 20$) und des MS-Kabels ($\frac{X}{R} = 0, 49$) mit 1 km Leitungslänge bei verschiedenen Arbeitspunkten innerhalb der Grenzen $U_c \pm 10 \%$ sowie einer Leitungsauslastung kleiner oder gleich 100 %.	91
3.12 Äquipotenziallinien des Spannungsniveaus am Ende der Freileitung ($\frac{X}{R} = 1, 20$) mit 20 km Leitungslänge bei verschiedenen Arbeitspunkten innerhalb der Grenzen $U_c \pm 10 \%$ sowie einer Leitungsauslastung kleiner oder gleich 100 %.	92
3.13 Äquipotenziallinien des Spannungsniveaus am Ende der Leitung (mit 20 km Leitungslänge) bei verschiedenen Arbeitspunkten und Limitierung der Arbeitspunkte auf einen Bereich zwischen 0,90 p. u. und 1,10 p. u. Die roten Punkte zeigen die ermittelten maximal anschließbaren Wirk- bzw. Blindleistungswerte bei Spannungsgrenzen $U_c + 2 \%$ / $- 5 \%$. Die gestrichelten roten Linien deuten ein heute typisches Blindleistungsverhalten an.	94
3.14 Spannungssensitivität der Freileitung in Abhängigkeit des Blindleistungsarbeitspunktes bei Arbeitspunkten innerhalb der Grenzen $U_c \pm 10 \%$ sowie einer Leitungsauslastung kleiner oder gleich 100 %.	95
3.15 Verlauf der Spannung und der Spannungssensitivität entlang der Blindleistungsachse bei konstantem $P = -50 \%$ an der Freileitung mit einer Leitungslänge von 20 km und den Spannungsgrenzen $U_c \pm 10 \%$ sowie einer Leitungsauslastung kleiner oder gleich 100 %.	97
3.16 Maximal mögliche Änderung der Spannungssensitivität je MVar bei konstantem P in der MS-Ebene für verschiedene Leitungstypen, Spannungsgrenzen und Blindleistungsbezugswerten.	98
3.17 Häufigkeit von 15-Minuten-Mittelwerten der 110-kV-Spannung eines Jahres von Beispielnetz Stadt_Zentrum auf Basis der Netzleistungsmessung des zuständigen Netzbetreibers. Die Klassenbreite beträgt ca. 0,0025 p. u.	101
3.18 Maximal mögliche Änderung der Spannungssensitivität am HS/MS-Transformator in % der minimalen Sensitivität bei konstantem P und normiert auf den Blindleistungsabruf in % je MVar. Die Strichpunktlinien zeigen die Änderung der Spannungssensitivität bei Berücksichtigung eines heute typischen Blindleistungsverhaltens.	102
3.19 Auf HS-Ebene bezogene Kurzschlussimpedanz an HS/MS-Netzknoten von Deutschland.	103

3.20	Äquipotenziallinien des Spannungsniveaus am Ende der HS-Leitung bei verschiedenen Arbeitspunkten und Limitierung der Arbeitspunkte auf einen Spannungsbereich zwischen 96 kV und 123 kV und bis zu einer maximalen Leitungsauslastung von 100 %.	105
3.21	Räumliche Darstellung der Äquipotenziallinien des Spannungsniveaus am Ende der HS-Leitung bei verschiedenen Arbeitspunkten mit Limitierung der maximalen Leitungsauslastung auf 100 %. Spannungsgrenzen sind nicht hinterlegt, wodurch die Simulation auch bei Erreichen der Stabilitätsgrenze abbricht.	106
3.22	Auf Nennscheinleistung S_r normierte Verluste von Kabel und Freileitung bei einer Leitungslänge von 20 km in Abhängigkeit des Arbeitspunktes und in den Spannungsgrenzen $U_c \pm 10\%$ und einer maximalen Leitungsauslastung von 100 %. Die roten Punkte kennzeichnen die maximalen Arbeitspunkte bei reinem Wirk- bzw. Blindleistungsverhalten bei Verwendung typischer Spannungsbandgrenzen ($U_c +2\% / -5\%$). Die gestrichelten roten Linien deuten ein heute typisches Blindleistungsverhalten an.	108
3.23	Maximal mögliche Änderung der Verlustsensitivität an den betrachteten MS-Leitungen in % der minimalen Sensitivität bei heute typischen Blindleistungsarbeitspunkten bei konstantem P und normiert je MVar Blindleistungsabruf.	110
3.24	Verluste am HS/MS-Transformator ($S_r = 40$ MVA) in Abhängigkeit des Arbeitspunktes sowie einer Transformatorauslastung kleiner oder gleich 100 %. Die gestrichelten roten Linien deuten ein heute typisches Blindleistungsverhalten an.	112
3.25	Maximal mögliche Änderung der Verlustsensitivität am HS/MS-Transformator in % der minimalen Sensitivität bei heute typischen Blindleistungsarbeitspunkten bei konstantem P und normiert je MVar Blindleistungsabruf.	113
3.26	Schematische Darstellung eines Zweigelements mit verfügbaren Sensitivitätswerten.	124
3.27	Darstellung typischer Blindleistungsgrenzen sowie des typischen Wirk-Blindleistungsarbeitsbereichs eines MS-Netzes im P - Q -Diagramm. P und Q sind auf die Nennscheinleistung $S_{r \text{ Trafo}}$ des HS/MS-Transformators normiert.	128
3.28	Phasen des Koordinationsalgorithmus.	134

3.29	Wirk-Blindleistungsverhalten eines MS-Netzes mit 345 eingezeichneten Eingriffs-klassen. Datenbasis bilden Simulationswerte in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres. . . .	135
3.30	Häufigkeit der Wirk- und Blindleistungsänderung zweier aufeinander folgenden 15-Minuten-Mittelwerte in Abhängigkeit ihrer Höhe. Datenbasis des Diagramms sind die Simulationswerte der Beispielnetzgruppe Stadt_Industrie (15-Minuten-Mittelwerte des Jahres 2015).	137
3.31	Ablauf der Optimierungsalgorithmus als Flussdiagramm.	149
3.32	Totaler r_T und phasenweiser $r_1 \dots r_3$ Korrelationskoeffizient zwischen Wirk- und Blindleistung von 13 Datensätzen unkomensierter Betriebe.	153
3.33	Darstellung der normierten Datenbasis (10-Minuten-Mittelwerte 13 unkomensierter Betriebe) im $\cos\varphi(\frac{P}{P_{\max}})$ - und $\tan\varphi(\frac{P}{P_{\max}})$ -Diagramm.	154
3.34	Ergebnis der Bestimmung der Verteilungsfunktion der $\tan\varphi$ -Werte in der Wirkleistungs-klassen $60 \% < \frac{P}{P_{\max}} \leq 65 \%$	156
3.35	Darstellung der normierten Datenbasis (Typ 4) und Untergruppen (Typ 1-3) im $\tan\varphi(P)$ -Diagramm.	157
3.36	Darstellung der Stützstellen der ermittelten Prognosefunktionen der vier betrachteten Betriebstypen zur Ableitung des unkomensierten Blindleistungsverhaltens von Betrieben.	159
3.37	Vergleich des Fehlers verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 1. Der Normierungswerte beträgt 290 kVAr.	162
3.38	Auf maximal auftretende Verschiebungsblindleistung (145 kVAr) normierter resultierender Fehler bei Verwendung der totalen Blindleistung anstelle der Verschiebungsblindleistung an Messpunkte 3.	164
3.39	Wirk- und Blindverluste von MS-Leitungen und MS/NS-Transformatoren.	166
3.40	Vergleich des Fehlers verschiedener Prognosetypen am Netzverknüpfungspunkt (NVP) in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen. Der Normierungswerte beträgt 675 kVAr.	167
3.41	Vergleich des Fehlers verschiedener Prognosetypen am Netzverknüpfungspunkt (NVP) in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen. Der Normierungswerte beträgt 675 kVAr.	168
3.42	Darstellung des Prognosemodells als Blockschaltbild.	169

3.43	Wirk-Blindleistungsverhalten des Beispielnetzes Stadt_Industrie (blau im Hintergrund) mit Datenpunkten (grün), die in Eingriffsklassen mit mehr als 100 Arbeitspunkten liegen. Datenbasis bilden Simulationswerte in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres.	178
4.1	Netzschema von Beispielnetz Stadt_Industrie mit geschlossenen MS-Ringen und eingezeichneten Blindleistungsquellen sowie ange-deuteten überlagertem HS-Ring.	182
4.2	Häufigkeit der 110-kV-Spannung an der Oberspannungsseite des HS/MS-Transformators von Beispielnetz Stadt_Industrie, basie-rend auf 15-Minuten-Mittelwerten der Netzleitsystemmessung des Netzbetreibers für die Jahre 2014, 2015 und 2016.	183
4.3	Blindleistungsverhalten der betrachteten MS-Netzgruppe Stadt_In-dustrie als Extrema und Mittelwerte je $\frac{1}{4}$ -h-Wert einer Woche über die Jahre 2014, 2015 und 2016. Datenbasis bilden Messwerte des Netzbetreibers in Form von 15-Minuten-Mittelwerten.	185
4.4	Wirkleistungsverhalten der betrachteten MS-Netzgruppe Stadt_In-dustrie als Extrema und Mittelwerte je $\frac{1}{4}$ -h-Wert einer Woche über die Jahre 2014, 2015 und 2016. Datenbasis bilden Messwerte des Netzbetreibers in Form von 15-Minuten-Mittelwerten.	186
4.5	Wirk-Blindleistungsverhalten der Netzgruppe ohne Blindleistungs-abruf Referenzjahr 2015 mit Einfärbung des Wochentagtyps (Tag 1 entspricht Sonntag „dunkelblau“). Datenbasis bilden Simulati-onswerte in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres.	187
4.6	Wirk-Blindleistungsverhalten der Netzgruppe ohne Blindleistungs-abruf Referenzjahr 2015 mit Einfärbung der Stunde des Tages. Datenbasis bilden Simulationswerte in Form von 15-Minuten-Mit-telwerten für den Zeitraum eines Jahres.	188
4.7	Extrema und Perzentilwerte des Wirk-Blindleistungsverhaltens von Betrieb 3. Datenbasis bilden Messdaten des Netzbetreibers zum Wirk-Blindleistungsverhalten des Betriebs in Form von 15-Minu-ten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres, über die das Po-tenzial abgeleitet wird.	191

4.8	Extrema und Perzentilwerte des induktiven/kapazitiven Blindleistungspotenzials von Betrieb 3. Datenbasis bilden Messdaten des Netzbetreibers zum Wirk-Blindleistungsverhalten des Betriebs in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres, über die das Potenzial abgeleitet wird.	192
4.9	Wirk-Blindleistungsverhalten des betrachteten Netzes mit eingezeichneten 345 Eingriffsklassen (P -Schrittweite = 1 MW, Q -Schrittweite = 0,5 MVar). Datenbasis bilden Simulationswerte in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres. . . .	196
4.10	Sensitivitätswerte der Spannung an Knotenelementen bezogen auf eine Blindleistungsänderung am Netzverknüpfungspunkt (NVP) von Betrieb 3.	202
4.11	Gewichtungsfaktoren je Blindleistungsquelle und Eingriffsklasse. .	204
4.12	Exemplarischer Blindleistungsabruf über den Zeitraum von acht Tagen für das Referenzjahr 2015. Datenbasis bilden Simulationswerte in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres.	205
4.13	Wirk-Blindleistungsverhalten der Netzgruppe ohne und mit Blindleistungsabruf aus den Blindleistungsquellen für das Referenzjahr 2015. Datenbasis bilden Simulationswerte in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres.	206
4.14	Wirk-Blindleistungsverhalten der Netzgruppe ohne und mit Blindleistungsabruf aus den Blindleistungsquellen für den unabhängigen Datensatz „Jahr 2016“. Datenbasis bilden Simulationswerte in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres. Hervorgehoben sind Arbeitspunkte in neuen, d. h. im Referenzdatensatz noch nicht belegten, Eingriffsklassen.	209
4.15	Häufigkeit verschiedener Wertebereiche der Blindleistungsänderung, der Abweichung der Blindleistungsänderung zum geplanten Blindleistungsabruf und des resultierenden Blindleistungsdefizits. . . .	210
4.16	Kumulierte Häufigkeit der Spannungswerte aller Netzknoten und Berechnungszeitpunkte mit korrigierten Totbandeinfluss des Stufenschalters.	211
4.17	Wirk-Blindleistungsdigramm des MS-Netzes mit Zoom auf Eingriffsklasse 317.	212

4.18	Wirk-Blindleistungsverhalten der Netzgruppe ohne und mit Blindleistungsabruf aus den Blindleistungsquellen für den unabhängigen Datensatz „Jahr 2016“. Datenbasis bilden Simulationswerte in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres. Hervorgehoben sind Arbeitspunkte in neuen, d. h. im Referenzdatensatz noch nicht belegten Eingriffsklassen.	213
4.19	Kumulierte Häufigkeit der Blindleistungsbilanzwerte mit einem Blindleistungsabruf aus den drei Quellen.	214
4.20	Häufigkeit verschiedener Wertebereiche der Blindleistungsänderung, der Abweichung der Blindleistungsänderung zum geplanten Blindleistungsabruf und des resultierenden Blindleistungsdefizits.	215
4.21	Maximal abrufbare Blindleistung je Eingriffsklasse.	216
4.22	Extrema und Mittelwerte des Blindleistungsabrufs je Quelle als $\frac{1}{4}$ -h-Wert einer Woche über alle Wochen eines Jahres.	217
4.23	Vergleich der Blindenergiebilanz des untersuchten MS-Netzes und deren Änderung bei Abruf Blindleistung aus den Blindleistungsquellen der MS-Ebene in den Szenarien S1_2 und S2_1.	219
A.1	Wirk-Blindleistungsverhalten eines MS-Netzes (Beispielnetz Stadt_Zentrum) mit dominanten MS-Betrieben. Wirk- und Blindleistung sind auf die Bemessungsleistung des HS/MS-Transformators $S_{r \text{ HS/MS-Transformator}}$ normiert, die 40 MVA beträgt. Datenbasis bilden Messwerte eines Netzbetreibers aus dem Projekt [2] in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres. . . .	231
A.2	Schematische Darstellung des Netzplanungsprozesses bei Netzbetreibern.	233
A.3	$\tan\varphi$ -Verhalten für verschiedene Auslastungsbereiche des HS/MS-Transformators und einer ausgewählten MS-Leitung von Beispielnetz Land_EZA.	235
A.4	Zusammenhang der Auslastung des HS/MS-Transformators von Beispielnetz Stadt_Industrie und der zeitgleichen Auslastung einer exemplarischen MS-Leitung.	237
A.5	Maximales Wirkleistungs- bzw. Blindleistungsverhalten am Leitungsende bei $\cos\varphi = 1,00$ bzw. $P = 0$ in Abhängigkeit der Leitungslänge und bei verschiedenen Spannungsgrenzwerten ($U_c = \pm 10\%$ bzw. $U_c = +2\% / -5\%$).	244
A.6	Äquipotenziallinien des Spannungsniveaus am Ende des Kabels mit 20 km Leitungslänge bei verschiedenen Arbeitspunkten. . . .	245

A.7	Spannungssensitivität des Kabels in Abhängigkeit des Blindleistungsarbeitspunktes bei Arbeitspunkten innerhalb der Grenzen $U_c \pm 10\%$ sowie einer Leitungsauslastungen $\leq 100\%$	246
A.8	Maximal mögliche Änderung der Spannungssensitivität in % der minimalen Sensitivität bei konstantem P in der MS-Ebene für verschiedene Leitungstypen, Spannungsgrenzen und Blindleistungsarbeitsbereiche.	248
A.9	Äquipotenziallinien des Spannungsniveaus an der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators bei verschiedenen Arbeitspunkten innerhalb der Grenzen $U_c \pm 10\%$ sowie einer Auslastung kleiner oder gleich 100%	249
A.10	Äquipotenziallinien der Spannungssensitivität an der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators bei verschiedenen Arbeitspunkten innerhalb der Grenzen $U_c \pm 10\%$ sowie einer Auslastung kleiner oder gleich 100%	250
A.11	Spannungssensitivität einer HS-Leitung mit 100 km Länge bei Arbeitspunkten innerhalb der Grenzen 96 kV bis 123 kV sowie bei maximalen Leitungsauslastungen $\leq 100\%$	251
A.12	Äquipotenziallinien des Gradienten der Verluständerung von Kabel und Freileitung bei einer Leitungslänge von 20 km in Abhängigkeit des Arbeitspunktes.	252
A.13	Verhältnis des maximal gemessenen induktiven Blindleistungspotenzials zur maximalen Wirkleistungsaufnahme verschiedener MS-Betreibe. Nach [7].	254
A.14	Verhältnis der installierten BKA-Leitung zur maximalen Wirkleistungsaufnahme verschiedener MS-Betreibe. Nach [7].	255
A.15	Verhältnis von minimal bzw. maximal gemessenen zu minimal bzw. maximal prognostizierten induktivem Blindleistungspotenzial. Nach [7].	256
A.16	Vergleich des auf den Maximalwert des unkompenzierten Verhalten normierten Fehlers verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 1. Der Normierungswerte beträgt 290 kVar	257
A.17	Vergleich des auf den Maximalwert des unkompenzierten Verhalten normierten Fehlers verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 2. Der Normierungswerte beträgt 198 kVar	258

A.18 Vergleich des auf den Maximalwert des unkompensierten Verhalten normierten Fehlers verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 3. Der Normierungswerte beträgt 145 kVar.	259
A.19 Vergleich des auf den Maximalwert des unkompensierten Verhalten normierten Fehlers verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 4. Der Normierungswerte beträgt 191 kVar.	260
A.20 Vergleich des Fehlers (Mittelwert und Standardabweichung) verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 1. Der Normierungswerte beträgt 290 kVar.	261
A.21 Vergleich des Fehlers (Mittelwert und Standardabweichung) verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 2. Der Normierungswerte beträgt 198 kVar.	262
A.22 Vergleich des Fehlers (Mittelwert und Standardabweichung) verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 3. Der Normierungswerte beträgt 145 kVar.	263
A.23 Vergleich des Fehlers (Mittelwert und Standardabweichung) verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 4. Der Normierungswerte beträgt 191 kVar.	264
A.24 Vergleich des Fehlers (Mittelwert und Standardabweichung) verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 5. Der Normierungswerte beträgt 675 kVar.	265
A.25 Wirk-Blindleistungsverhalten und induktives/kapazitives Blindleistungspotenzial von Betrieb 1.	267
A.26 Wirk-Blindleistungsverhalten und induktives/kapazitives Blindleistungspotenzial von Betrieb 2.	268
A.27 Wirk-Blindleistungsverhalten und induktives/kapazitives Blindleistungspotenzial von Betrieb 3.	269
A.28 Wirk-Blindleistungsverhalten von Betrieb 1 je Woche des Jahres 2015, basierend auf Messdaten des Netzbetreibers in Form von 15-Minuten-Mittelwerten.	270
A.29 Wirk-Blindleistungsverhalten von Betrieb 2 je Woche des Jahres 2015, basierend auf Messdaten des Netzbetreibers in Form von 15-Minuten-Mittelwerten.	271

A.30 Wirk-Blindleistungsverhalten von Betrieb 3 je Woche des Jahres 2015, basierend auf Messdaten des Netzbetreibers in Form von 15-Minuten-Mittelwerten.	272
A.31 Auslastungen und Auslastungsfreiräume der Zweigelemente im unbeeinflussten Zustand.	274
A.32 Spannungsniveau und Spannungsfreiräume der Knotenelemente im unbeeinflussten Zustand ohne und mit korrigierten Totbandeinfluss des Stufenschalters.	275
A.33 Extrema der Zweigauslastung und Spannungsniveaus.	276
A.34 Sensitivitätswerte der Blindleistungsflüsse und -Verluste an Zweigelementen bezogen auf Betrieb 3.	277
A.35 Sensitivitätswerte der Wirkleistungsflüsse und -Verluste an Zweigelementen bezogen auf Betrieb 3.	278
A.36 Maximal abrufbare Blindleistung je Eingriffsklasse.	279
A.37 Spannungsextrema je Knotenelement ohne und mit Blindleistungsabruf sowie mit korrigierten Totbandeinfluss des Stufenschalters.	280
A.38 Auslastungsextrema je Zweigelement ohne und mit Blindleistungsabruf.	280
A.39 Extrema der Auslastungsänderung je Zweigelement.	281
A.40 Extrema der Spannungsänderung je Knotenelement mit korrigierten Totbandeinfluss des Stufenschalters.	281
A.41 Häufigkeit der Extrema der Spannungsänderung an Knotenelementen ohne korrigierten Totbandeinfluss des Stufenschalters.	282
A.42 Häufigkeit der Blindleistungsänderung, der Abweichung der Blindleistungsänderung zum geplanten Blindleistungsabruf und des resultierenden Blindleistungsdefizits.	283
A.43 Spannungsextrema je Knotenelement ohne und mit Blindleistungsabruf sowie korrigierten Totbandeinfluss des Stufenschalters.	284
A.44 Auslastungsextrema je Zweigelement ohne und mit Blindleistungsabruf.	285
A.45 Extrema der Auslastungsänderung je Zweigelement.	285
A.46 Extrema der Spannungsänderung je Knotenelement mit korrigierten Totbandeinfluss des Stufenschalters.	286
A.47 Spannungsextrema je Knotenelement ohne und mit Blindleistungsabruf sowie korrigierten Totbandeinfluss des Stufenschalters.	287
A.48 Auslastungsextrema je Zweigelement ohne und mit Blindleistungsabruf.	288

A.49 Extrema der Auslastungsänderung je Zweigelement.	288
A.50 Extrema der Spannungsänderung je Knotenelement mit korrigierten Totbandeinfluss des Stufenschalters.	289

Tabellenverzeichnis

3.1	Verwendete Zweigtypen im vereinfachten Netzmodell	82
3.2	Abschätzung der Änderung der Spannungssensitivität bei einem induktiven Blindleistungsabruf von ΔQ gleich 4 MVar am Arbeitspunkt (AP) Schwachlast ($Q = -10 \%$, $P = 0$).	129
3.3	Beschreibung der auszuwertenden Typen der Datenbasis.	158
3.4	Beschreibung der auszuwertenden Typen der Datenbasis.	163
3.5	Ein- und Ausgangsdaten des Prognosemodells	169
4.1	Kenngrößen der drei in der Simulation verwendeten Betriebe. . . .	189
4.2	Beschreibung der Simulationsszenarien zur Evaluierung des Steuerungsverfahrens.	194
4.3	Korrekturfaktoren zur Nachbildung der Arbeitspunktabhängigkeit der Sensitivitätswerte.	198
A.1	Eckdaten der Netzebene 4	229
A.2	Eckdaten der Netzebene 5	229
A.3	Eckdaten der Netzebene 6	229
A.4	Installierte EZA-Leistung	230
A.5	Sonstige Eckdaten	230
A.6	Parameter der verwendeten Leitungen	242
A.7	Parameter des verwendeten Transformators	242
A.8	Parameter der verwendeten Leitungen	266
A.9	Parameter der verwendeten Transformatoren	266

Abkürzungsverzeichnis

AEF	Ausschuss für Formelgrößen
ARegV	Anreizregulierungsverordnung
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BKA	betrieblichen Kompensationsanlage
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BNetzA	Bundesnetzagentur
DCC	Demand Connection Code
EMT	electro magnetic transient
entso-e	European Network of Transmission System Operators for Electricity
EnWG	Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz)
EZA	dezentrale Erzeugungsanlage
FENES	Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher
FFT	Fast Fourier Transformation
FNN	Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE
G0	Standardlastprofil für Gewerbekunden
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleister
GIS	Geoinformationssystem
H0	Standardlastprofil für Haushaltskunden
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung

Abkürzungsverzeichnis

HöS	Höchstspannung
HS	Hochspannung
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IMOWEN	Integration großer Mengen On- und Offshore erzeugter Windenergie in das elektrische Netz durch intelligente Netzanalyse und Clusterbetriebsführung
INA	Institut für Netz- und Anwendungstechnik GmbH
MS	Mittelspannung
NAV	Niederspannungsanschlussverordnung
NS	Niederspannung
NVP	Netzverknüpfungspunkt
ONS	Ortsnetzstationen
ONT	Ortsnetztransformator
OS	Oberspannungsseite
PQM	PowerQualityManager
PV	Photovoltaikanlage
QQM	Blindleistungsquellenmanager
RFG	Requirements for Generators
RLM	registrierende Lastgangmessungen
RMS	root mean square
RONT	regelbarer Ortsnetztransformator
SDL	Systemdienstleistungen
SLP	Standardlastprofile
STD	Standardabweichung
StromNEV	Stromnetzentgeltverordnung
TAB	Technische Anschlussbedingung

TAR	Technische Anschlussregeln
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
US	Unterspannungsseite
UW	Umspannwerk
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VNB	Verteilungsnetzbetreiber
WEA	Windenergieanlage
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.

Nomenklatur

Folgende Nomenklatur wird in dieser Arbeit verwendet:

- **Skalare:** kursive Schrift, z. B. a oder U . Großbuchstaben werden für Effektivwerte genutzt, z. B. Spannungseffektivwert U .
- **Vektoren:** mit übergesetztem Pfeil, z. B. \vec{v} oder \vec{V} .
- **Komplexe Größen:** wie Skalare, jedoch mit waagrechtem Strich unter dem Zeichen, z. B. \underline{z} oder \underline{Z} . Der Betrag der komplexen Größe ist gleich zu setzen mit dem Effektivwert der Größe, z. B. $|\underline{U}| = U$.
- **Matrizen:** dickgedruckte Großbuchstaben, z. B. \mathbf{J} .
- **Zeitabhängige Größen:** Der Augenblickswert wird als klein geschriebener Skalar in Abhängigkeit der Zeit ausgedrückt (z. B. $u(t)$), der Scheitelwert wird über ein Circumflex gekennzeichnet (z. B. \hat{u}) und der Effektivwert als Großbuchstabe (z. B. U). Zeitreihen mit diskreten Werten und äquidistanter Schrittweite werden als Funktionen der Variable w und Δt ausgedrückt (z. B. $U(w, \Delta t)$). Bei auf 15-Minuten-Mittelwerten basierenden Jahreszeitreihen beträgt $\Delta t = 15$ Minuten und $w = 1, 2, 3, \dots, 35040$.
- **Differenzen** werden mit Δ gekennzeichnet (z. B. ΔP).
- Auf km bezogene Größen („**Beläge**“) werden mit $'$ gekennzeichnet (z. B. R').

Symbolverzeichnis

Das folgende Symbolverzeichnis verwendet sowohl die SI-Basiseinheiten, als auch die definierten 22 abgeleiteten SI-Einheiten mit besonderen Namen.

B	S	Blindleitwert
$\vec{c}(\vec{x})$		Gleichungsnebenbedingungen der Optimierung
χ		Lösungsraum der Optimierung
$\cos\varphi$		Verschiebungsfaktor
d		Schleifenzähler der iterativen Optimierung
Δt	s	äquidistante Zeitreihenschrittweite
$\vec{f}(\vec{x})$		Zielfunktion der Optimierung
G	S	Wirkleitwert
g_Q		Gewichtungsfaktor für Blindleistungsabruf
$\vec{h}(\vec{x})$		Ungleichungsnebenbedingungen der Optimierung
I	A	Betrag des Stroms
\underline{i}	A	komplexer Strom
\mathbf{J}^{-1}		inverse Jakobimatrix mit Spannungssensitivitäten
KF_{SePv}	$\frac{\%}{\text{VAr}}$	Korrekturfaktor der Wirkverlustleistungssensitivität
KF_{SeQv}	$\frac{\%}{\text{VAr}}$	Korrekturfaktor der Blindverlustleistungssensitivität
KF_{SeU}	$\frac{\%}{\text{VAr}}$	Korrekturfaktor der Spannungssensitivität
n		Stufenschalterposition (absolut)

Symbolverzeichnis

P	W	Wirkleistung
φ	°	Phasenverschiebungswinkel zwischen der Strom- und Spannungsgrundsgrundschwingung
P_V	W	Wirkverluste
Q	VA _r	Blindleistung
Q_{total}	VA _r	totale Blindleistung
Q_V	VA _r	Blindverluste
Q_1	VA _r	Verschiebungsblindleistung
R	Ω	Wirkwiderstand
r		Korrelationskoeffizient
S	VA	Scheinleistung
SeP	$\frac{W}{VA_r}$	Wirkleistungssensitivität eines Zweigelements
$SePv$	$\frac{W}{VA_r}$	Wirkverlustleistungssensitivität eines Zweigelements
SeQ	$\frac{VA_r}{VA_r}$	Blindleistungssensitivität eines Zweigelements
$SeQv$	$\frac{VA_r}{VA_r}$	Blindverlustleistungssensitivität eines Zweigelements
SeU	$\frac{p. u.}{VA_r}$	Spannungssensitivität eines Knotenelements
t	s	Zeit
Θ	°	Spannungswinkel
U	V	Betrag der Spannung
\underline{u}	V	komplexe Spannung
U_c	V	vereinbarte Versorgungsspannung
\ddot{u}		Übersetzungsverhältnis
\vec{x}		Vektor mit Entscheidungsvariablen der Optimierungsfunktion

w		Zeitreihenindex
X	Ω	Reaktanz
Y		Admitanzmatrix
Z	Ω	Impedanz

Indizes

Abruf	Abgerufener Wert
AC	bezogen auf typische Sensitivitätsänderung
akt	bezogen auf aktuellen Wert der Blindleistungsquelle
Anhebung	Spannungsanhebung
AP	bezogen auf Verhältnisse im aktuellen Arbeitspunkt
b	Blindanteil
Bedarf	benötigter Wert
Bilanz	Saldo aus induktivem und kapazitivem Verhalten an definierten Netzknoten
c	Vertragsgröße „contract“
DC	bezogen auf maximale Sensitivitätsänderung
Defizit	Abweichung von Istwert zum Sollwert
down	Stufenschalterposition unter Neutralposition
Einsatz	eingesetzter bzw. aktiver Wert
elektr.	elektrisch
EZA	bezogen auf Erzeugungsanlage
EZA	bezogen auf Netzverknüpfungspunkt
Fall	Spannungsfall
Fluss	Leistungsflussänderung, die durch direkte Änderung des Leistungsfluss an der Quelle verursacht wird

Symbolverzeichnis

frei	freies Spannungsband/Auslastungsbereich
Grenz	Grenzwert
HS	bezogen auf HS-Ebene
HS/MS	bezogen auf HS/MS-Ebene
ind	induktiv
inst	bezogen auf installierte Leistung
ist	Istwert
it	Ergebnis der aktuellen Iterationsschleife
k	Kurzschluss
kap	kapazitiv
Knoten	bezogen auf Knotenelement
kor	von iterativen Arbeitspunktkorrektur beeinflusst
lf	Längsspannungsfall
LA	bezogen auf Leitungsanfang
Last	bezogen auf NS-Last
LE	bezogen auf Leitungsende
LL	bezogen auf Verhältnisse im Leerlauffall
max	maximaler Wert
mean	Mittelwert
mess	gemessene Größe
min	minimaler Wert
MS	bezogen auf MS-Ebene
Netz	Leistungsflussänderung, die durch Verluständerung anderer Netzelemente verursacht wird
neutral	Stufenschalterposition der Neutralposition

NS	bezogen auf NS-Ebene
ONT	bezogen auf MS/NS-Transformator
Pot Defizit	Fehlendes Potenzial
Pot	Potenzial
Prog	prognostizierte Größe
q	bezogen auf Blindenergie
qf	Querspannungsfall
Quelle	bezogen auf Blindleistungsquelle
r	Bemessungsgröße „rated“
RB	Regelbandbreite des HS/MS-Transformators
rel	relative Größe
soll	Sollwert
ST ONT	Stufenspannung des MS/NS-Transformators
ST UW	Stufenspannung des HS/MNS-Transformators
TAP	Stufenschalterposition des HS/MS-Transformators (relativ zur Neutralposition)
TAP	Tap Changer bzw. Stufenschalter
tech	technisches Potenzial
typ	bezogen auf typisches Blindleistungsverhalten
unk	bezogen auf unkompensierte Leistung
up	Stufenschalterposition über Neutralposition
US	bezogen auf Unterspannungsseite
UW	bezogen auf HS/MS-Transformator
V	Verluste
w	Wirkanteil

Symbolverzeichnis

zul zulässiger Grenzwert

Zweig bezogen auf Zweigelement

Indizes - Zählvariablen

e	Zählvariable für Eingriffsklassen
i	Zählvariable für Knotenelemente
k	Zählvariable für Gleichungsnebenbedingungen
l	Zählvariable für Entscheidungsvariablen
m	Zählvariable für Zweigelemente
n	Anzahl an Knotenelementen
q	Zählvariable für Blindleistungsquellen
u	Zählvariable für Ungleichungsnebenbedingungen
z	Zählvariable für Erzeugungsanlage mit spannungsabhängiger Blindleistungsregelung

Danksagung

Am Ende meiner Promotion möchte ich mich an dieser Stelle bei den Unterstützern meiner Arbeit bedanken, ohne deren Zutun ein erfolgreicher Abschluss meiner Dissertation nicht ohne weiteres möglich gewesen wäre.

Bei Professor Dr.-Ing. Oliver Brückl möchte ich mich vor allem für den Glauben an mich, die fachliche Betreuung und die motivierenden Gespräche bedanken. Professor Dr.-Ing. Hans-Peter Beck gilt mein Dank, da er durch die Betreuung meiner Promotion diese überhaupt erst ermöglicht hat.

Weiter möchte ich mich bei meinen ehemaligen Kollegen an der Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher der OTH Regensburg bedanken, die für fachliche Diskussionen immer bereitstanden. Insbesondere möchte ich hier Christian Adelt, Johannes Eller, Ulrike Mayer, Johannes Rauch und Thomas Sippenauer danken, die mich entlastet, motiviert und meine Arbeiten kritisch hinterfragt haben.

Meine Promotion entstand aufbauend auf Untersuchungen im Forschungsprojekt SyNErgie und wurde durch die dort mit den Projektpartnern geführten Gespräche geprägt. Für die äußerst gute Zusammenarbeit möchte ich mich bei allen Projektpartnern bedanken und besonders bei Andreas Günther, der mich im Projekt stets fachlich und organisatorisch im besonderen Maße unterstützt hat.

Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner Familie und meinen Freunden, die während meiner Promotionszeit oft auf mich verzichten mussten. Besonders meiner Frau Ines möchte ich danken, dass sie neben ihrer Promotion Zeit fand mich zu unterstützen. Ihr und auch meinen Töchtern Anna und Sophia gilt mein Dank.

Kapitel 1

Einleitung

Zu Beginn dieser Arbeit werden die zugrundeliegende Motivation, die daraus abgeleitete Aufgabenstellung sowie der Aufbau der Arbeit erläutert.

1.1 Motivation

Die in Deutschland eingeleitete Energiewende entspricht nicht einer einfachen Umstellung der Energieerzeugung auf regenerative Energieträger. Vielmehr ist mit ihr eine komplette Neuausgestaltung von Erzeugung, Transport und Vertrieb von elektrischer Energie verbunden. Durch die politischen Entscheidungen (z. B. Klimaziele und Ausbauziele für erneuerbare Energien) und Förderprogramme für dezentrale Erzeugungsanlagen (EZA) im Zuge der Energiewende entsteht vor allem im Verteilungsnetz eine Vielzahl von EZA kleinerer bis mittlerer Größe. Mit steigender Anlagenanzahl im Verteilungsnetz wird temporär der lokale Leistungsbedarf überschritten und es kommt zu einer Rückspeisung in die überlagerten Netzebenen und somit zu einer Lastflussumkehr. Da das Stromnetz bislang auf ein „Top-down“-Prinzip ausgelegt war, d. h. auf einen Lastfluss von den Erzeugungsanlagen im Übertragungsnetz (konventionelle Kraftwerke) hin zum Verteilungsnetz und den dort befindlichen Verbrauchern, müssen Verteilungsnetzbetreiber (VNB) zunehmend auf die geänderte Versorgungsaufgabe reagieren. VNB stehen somit vor der Herausforderung ihre Netze möglichst sicher, preisgünstig und umweltverträglich zu planen und zu betreiben, wie es im Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz) (EnWG) § 1 Abs. 1 [8] gefordert wird.

Die momentan vorherrschende Kernfrage ist dabei, wie die Netze möglichst effizient gestaltet werden können, um möglichst viele regenerative EZA aufnehmen zu können. Primär ist hierbei die Einhaltung von Spannungsbandgrenzen und die Vermeidung von Netzbetriebsmittelüberlastungen im eigenen Netz sicherzustellen. Die auftretenden Spannungsniveaus und Betriebsmittelauslastungen werden über die sich einstellenden Wirk- und Blindleistungsflüsse bestimmt. Um den Einfluss auf die Spannungshaltung und Betriebsmittelauslastung im überlagerten Netz zu begrenzen bzw. planbar zu machen, gibt es fest vereinbarte Grenzwerte für die Wirk- und Blindleistungsbilanz am Netzverknüpfungspunkt zwischen Netzbetreibern. Zwar bestehen schon heute vertragliche Regelungen, jedoch spielte die tatsächliche Einhaltung dieser im Hinblick auf die Blindleistungsgrenzen bis vor wenigen Jahren nur eine untergeordnete Rolle. Diese inkonsequente Handhabung von Blindleistungsgrenzen spiegelt sich auch in der heutigen Netzplanungspraxis von Verteilungsnetzen¹ wieder, in der bislang keine oder nur eine rudimentäre Abbildung der Blindleistungsflüsse stattfindet (z. B. Berücksichtigung fester $\cos\varphi$ -Werte für Verbraucher). Durch den mit der Energiewende verbundenen Rückgang der Anzahl an konventionellen Kraftwerken fallen wichtige Blindleistungsquellen sukzessiv weg und zeitgleich steigen die induktiven² (untererregtes Verhalten) und kapazitiven (übererregtes Verhalten) Extrema des Blindleistungsbedarfs des deutschen Stromnetzes, wie Studie [9] zeigt. Die Spreizung der Blindleistungsextrema resultiert dabei durch das induktivere Verhalten von Netzbetriebsmitteln aufgrund der höheren Auslastung und dem Einsatz von Blindleistung zur Spannungshaltung. Das kapazitive Maximum steigt aufgrund des Netzausbaus und dem damit verbundenen Anstieg der kapazitiven Ladeleistung der Netze. Die Berücksichtigung von Blindleistungsflüssen nimmt somit eine immer wichtiger werdende Rolle ein, da sie einerseits die Spannungshaltung und andererseits Betriebsmittelbelastung im eigenen Netz, aber auch im vorgelagerten beeinflusst.

Im Übertragungsnetz erfolgt die Spannungshaltung primär mittels der Spannungsblindleistungsregelung. Über konventionelle Kraftwerke und Kompensationsanlagen wird gezielt Blindleistung eingesetzt, um die durch die Leistungsflüsse verursachten Spannungsfälle und -anhebungen entlang der Höchstspannung

¹Selbst im Netzentwicklungsplan von 2014 wird das Blindleistungsverhalten der HS-Ebene nur über feste $\cos\varphi$ -Werte nachgebildet, wie bei der Erstellung der Studie [9] festgestellt werden konnte.

²Die Blindleistungsangaben in dieser Arbeit beziehen sich auf das Verbraucherzählpfeilsystem. Eine induktive Blindleistung bezeichnet somit ein untererregtes „spannungssenkendes“ Verhalten bzw. eine kapazitive Blindleistung ein übererregtes „spannungshebendes“ Verhalten. Weitere Erläuterungen sind in Abschnitt 2.1 formuliert.

(HöS)-leitungen zu begrenzen. Der Blindleistungsbedarf der Verteilungsnetze (Bilanz von HS-Ebene und unterlagerten Netzebenen) beeinflusst in gleicher Weise die Spannung im HöS-Netz, jedoch muss dieser kompensiert bzw. begrenzt werden, was mit weniger zur Verfügung stehenden Kraftwerken und der notwendigen örtlichen Nähe zwischen Blindleistungsbedarf und Blindleistungsquelle zunehmend schwieriger wird. Werden Grenzwerte verletzt, so kann im vorgelagerten Netz u. U. die Einhaltung der Spannungsbandgrenzen nicht sichergestellt werden. [10] beschreibt beispielsweise einen Fall, bei dem durch die Abschaltung des Atomkraftwerks Biblis Spannungshaltungsprobleme entstanden, denen durch die Installation eines rotierenden Phasenschiebers in Block A entgegengewirkt wird. Zukünftig ist vermehrt mit solchen Problemen zu rechnen, weshalb die Maßnahmendefinition zur Beeinflussung der Blindleistungsbilanz von Verteilungsnetzen ein wichtiger Bestandteil der Netzplanung werden wird.

1.2 Aufgabenstellung

Eine offensichtliche Möglichkeit das in Abschnitt 1.1 beschriebene Problem zu lösen, besteht darin, neue Kompensationsanlagen (Kondensatoren und/oder Drosselspulen) zentral³ am Netzverknüpfungspunkt zum vorgelagerten Netzbetreiber zu installieren, was mit entsprechenden Investitionen und Betriebskosten verbunden ist. Im Rahmen dieser Arbeit wird dieser Ansatz um eine „volkswirtschaftliche“ Komponente erweitert. Grundgedanke hierbei ist, dass der aktuelle Blindleistungseinsatz überprüft und im ersten Schritt bei Bedarf bestehende Blindleistungsquellen im Netz genutzt werden, bevor neue Blindleistungsquellen installiert werden. Blindleistungsquellen sind dabei technologieoffen zu erfassen, zu bewerten und sinnvoll einzusetzen bzw. vorzuhalten⁴. Durch die technologieoffene Betrachtung werden nicht nur die bislang fokussierten EZA berücksichtigt, sondern z. B. auch Betriebe mit Kompensationsanlagen. Letztere kompensieren derzeit unabhängig von den Netzverhältnissen einen Großteil ihres induktiven Verhaltens. Eine erste Potenzialstudie [3] zu diesem Thema wurde vom Autor dieser Arbeit in Zusammenarbeit mit dem Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI), dem Institut für Netz- und Anwendungstechnik GmbH (INA) und der OTH Regensburg verfasst.

³Zentral bzw. dezentral beziehen sich in dieser Arbeit auf eine räumliche Anordnung bzw. Verteilung.

⁴Einen Ausblick, welche überschüssigen Kapazitäten sich durch eine pauschale Blindleistungsvorhaltung bei EZA zukünftig ergeben, diskutiert die Studie [9].

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Berücksichtigung von Blindleistungsquellen im Verteilungsnetz, über das im Rahmen der Netzplanung ein möglicher netzdienlicher Beitrag zur Optimierung der Blindleistungsbilanz eines Netzes bewertet und entsprechende Steuerparameter für geeignete Anlagen abgeleitet werden können. Dieses Verfahren wird im Folgenden als Steuerungsverfahren bezeichnet. Die ermittelten Steuerparameter stellen somit die Grundlage für einen Blindleistungsabruf auf Seiten der Netzführung dar. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der netzplanerischen Ermittlung der Steuerparameter, Aspekte der Netzführung werden an verschiedenen Stellen andiskutiert. Die einzuhaltenden Blindleistungsgrenzen werden hierbei als gegeben angesehen.

Um die Blindleistungspotenziale bestmöglich nutzbar zu machen, wird ein dezentraler Ansatz gewählt. Unter dezentral ist dabei zu verstehen, dass nicht zwangsläufig nur eine „zentrale Blindleistungsquelle“ mit möglichst günstigem Anschlusspunkt (d. h. nahe am NVP zur überlagerten Netzebene), sondern auch elektrisch tief im Netz angeschlossene Anlagen berücksichtigt werden. In Folge dessen werden im Steuerungsverfahren Netzrestriktionen (Spannungshaltung und Betriebsmittelauslastung) der MS-Ebene abgebildet und keine rein bilanzielle Betrachtung durchgeführt. Bestandsanlagen, aber auch neue Blindleistungsquellen, können durch das hier entwickelte Verfahren netzdienlich eingebunden werden.

Der Begriff Steuerung wird verwendet, da die im Mittelpunkt stehenden Steuerparameter auf die Steuergröße eines Regel- bzw. Steuerkreises wirken. Die Steuerparameter werden seitens der Netzplanung ermittelt und stellen planerisch einen zulässigen Blindleistungsabruf sicher. Dies ist notwendig, da vor allem in der MS-Ebene aufgrund der geringen Dichte an messtechnischer Netzüberwachung und Kommunikationsverbindungen⁵ der Aufwand für den Anschluss der Blindleistungsquellen und Messstellen an eine im Netzleitsystem integrierte zentrale Regelung kostenintensiv sein kann.

Räumlich wird das Verfahren mittels der Betrachtung einzelner MS-Netze entwickelt. Dies geschieht wohl wissend, dass die relevanten Blindleistungsgrenzen für Verteilungsnetze i. d. R. für mehrere MS-Netze gelten. Jedoch wird unterstellt, dass das entwickelte Verfahren auf mehrere Netzgruppen parallel an-

⁵Einzelne Netzbetreiber binden bereits heute standardmäßig EZA mit Anschlusspunkt in der MS-Ebene an die Netzleitstelle an, wie Erfahrungen aus dem Forschungsprojekt [2] zeigen. Die Kosten wurden hierbei in Höhe von ca. 3 T€ pro Anschluss beziffert. Eine flächendeckende Überwachung ist heute nicht gegeben.

wendbar ist und somit in dieser Arbeit die Basis für ein großflächiges Blindleistungsmanagement in der MS-Ebene erarbeitet wird. Diese Spannungsebene wird zudem bewusst gewählt, da dort deutlich mehr Entwicklungsbedarf besteht als in den überlagerten Netzebenen. In den höheren Spannungsebenen werden bereits heute EZA und netzbetreibereigene Kompensationsanlagen zum gezielten Blindleistungsabruf genutzt. Allerdings ist die Mess- und Steuerungstechnik hier in deutlich größerem Umfang als in der Mittelspannung vorhanden, weshalb primär Regelungskonzepte umgesetzt bzw. in Entwicklung sind (z. B. [11, 12, 13]).

Weiter wird im Rahmen dieser Arbeit näher auf Betriebe mit Kompensationsanlagen als einbeziehbare Blindleistungsquellen eingegangen. Deren Potenzial ist bis dato gänzlich unbekannt⁶. Grundsätzlich soll das entwickelte Verfahren analog auf andere, auch zukünftige Blindleistungsquellen wie z. B. Speicher oder die Ladeinfrastruktur der Elektromobilität anwendbar sein, weshalb es Blindleistungsquellen auf ihr Verhalten am Netzverknüpfungspunkt reduziert.

Mit dieser Arbeit soll die heute übliche rudimentäre Berücksichtigung des Blindleistungshaushalts im Rahmen der Netzplanung aufgegriffen und durch eine Erweiterung des Netzplanungsprozesses verbessert werden. Im Fokus steht die Entwicklung und Evaluierung dieser Erweiterung, die Aus- und Wechselwirkungen auf den gesamten Netzplanungsprozess können nicht voll umfänglich diskutiert werden. Eine wirtschaftliche Bewertung (d. h. die Bewertung von Kosten für die Vorhaltung und den Abruf von Blindleistung) dieses Ansatzes ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Diese Arbeit könnte somit die Grundlage für weitere Forschungsarbeiten bilden.

⁶Die ZVEI-Studie [3] beinhaltet vereinfachte Untersuchungen zur Anhebung des Kompensationsgrads von Betrieben und deutschlandweite Hochrechnungen, die genaue Betrachtung von einzelnen realen MS-Netzen ist nicht Bestandteil der Studie.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zu Beginn der Arbeit werden in Kapitel 1 die Motivation, die Aufgabenstellung und der Aufbau erläutert. Im anschließenden Kapitel 2 werden zunächst notwendige Begrifflichkeiten definiert. Anschließend wird die Problemstellung „Einhaltung der Blindleistungsbilanz im Verteilungsnetz“ unter verschiedenen Gesichtspunkten diskutiert und darauf aufbauend (Abschnitt 2.6) die resultierenden Anforderungen an ein Verfahren zur Beeinflussung der Blindleistungsbilanz von MS-Netzen durch Steuerung von Blindleistungsquellen am Beispiel betrieblicher Kompensationsanlagen abgeleitet. In Kapitel 3 wird in Abschnitt 3.1 zunächst ein Gesamtkonzept und dessen einzelne Bausteine beschrieben, bevor die Entwicklung der relevanten Teilprozesse in den folgenden Abschnitten erläutert wird. Abschließend werden in Abschnitt 3.6 die für das Gesamtkonzept resultierenden Thesen formuliert. Kapitel 4 beinhaltet die Evaluierung des entwickelten Verfahrens. Dieses wird auf einzelne Fallbeispiele (Simulationen eines realen MS-Netzes) angewendet und die Einhaltung der in Abschnitt 3.6 formulierten Thesen überprüft. Kapitel 5 beinhaltet ein Resumé zur Arbeit, sowie Hinweise für die Praxis und Anknüpfungspunkte für zukünftige Forschungsarbeiten. Im Anhang werden relevante Grundlagen und weiterführende Informationen bereitgestellt.

Kapitel 2

Grundlagen, Einordnung und Abgrenzung der Aufgabenstellung

Die vorliegende Arbeit thematisiert ein Verfahren, über das die Einhaltung von Grenzwerten der Blindleistungsbilanz von MS-Netzen durch Nutzung von Blindleistungsquellen am Beispiel betrieblicher Kompensationsanlagen unter Einhaltung netzplanerischer Randbedingungen unterstützt wird. Zur Einordnung und Abgrenzung der Aufgabenstellung werden deshalb im Folgenden relevante Grundlagen und Diskussionspunkte aus den Bereichen Ordnungsrahmen und Regelwerke, Grundlagen zu MS-Netzen, Aspekte der Netzplanung und Einsatz betrieblicher Kompensationsanlagen diskutiert, bevor die Aufgabenstellung und die dadurch resultierenden Anforderungen an einen sinnvollen Lösungsansatz in Abschnitt 2.6 zusammengefasst werden.

2.1 Begriffsdefinitionen

Im Folgenden werden für das Verständnis dieser Arbeit notwendige Begriffsdefinitionen eingeführt und erläutert.

- Der Begriff **Blindleistung**, im Sinne der Definition der Blindleistungsarten nach DIN 40110 [14], beschreibt in dieser Arbeit die Verschiebungsblindleistung der Grundschiwingung, die auf eine Phasenverschiebung zwischen

Spannung und Strom zurückzuführen ist. Nur bei dieser Blindleistungsart erfolgt der Zusatz induktiv bzw. kapazitiv. Bei kapazitiver Blindleistung eilt der Strom der Spannung vor, bei induktiver die Spannung dem Strom, wenn man das Verbrauchzählpeilsystem unterstellt. Diese Bezeichnung alleine ist nicht eindeutig, da sie vom verwendeten Bezugspfeilsystem (Erzeuger- bzw. Verbraucherzählpeilsystem) abhängt. In Technische Anschlussregeln (TAR) bzw. Technischen Anschlussbedingungen (TAB) wird deshalb meist von einem untererregten und übererregten Verhalten gesprochen, das in Analogie zu Synchrongeneratoren das Blindleistungsverhalten beschreibt. Diese Arbeit legt sich auf das Verbrauchzählpeilsystem fest, weshalb im Folgenden eine induktive Blindleistung ein untererregtes, d. h. ein „spannungssenkendes“ Verhalten bzw. eine kapazitive Blindleistung ein übererregtes, d. h. ein „spannungsanhebendes“ Verhalten bezeichnet. Die Einschränkung auf die Verschiebungsblindleistung der Grundschwingung (im Folgenden vereinfacht als Verschiebungsblindleistung bezeichnet) wird gemacht, da diese im Stromnetz heute bereits relevante Größenordnungen annimmt und deshalb definierten Randbedingungen unterliegt. Die Blindleistungsarten Oberschwingungsblindleistung, Modulationsblindleistung und Unsymmetrieblindleistung nach DIN 40110 [14] werden nicht weiter diskutiert, für weiterführende Informationen sei auf [15] verwiesen. Verschiebungsblindleistung entsteht primär durch den Auf- und Abbau elektrischer und magnetischer Felder, wie es bei Spulen und Kondensatoren an Wechselstrom der Fall ist. Darüber hinaus erzeugen auch nichtlineare Verbraucher (z. B. Energiesparlampen, Schaltnetzteile von Konsumelektronik oder Gleichrichter von LED-Lampen) Grundschwingungsstromanteile, die eine Phasenverschiebung zur Spannungsgrundschwingung aufweisen können. Eine weitere Entstehungsmöglichkeit für Verschiebungsblindleistung sind unsymmetrische Mehrleiternetze, wobei hier nicht die Unsymmetrieblindleistung nach [14] gemeint ist, die bei der „bilanzierten“ Bewertung auftritt. Betrachtet man ein Mehrleitersystem phasenscharf, so dienen als Bezugsgrößen die Spannung an der Messklemme und der Stromfluss in die entsprechende Phase. Nimmt man die Außenleiterspannungen eines einzelnen Hausanschlusses als nahezu ideal an, so tritt bei rein ohmscher aber unsymmetrischer Belastung Verschiebungsblindleistung aufgrund eines nicht in Phase zu den Außenleiterspannungen fließenden Stroms in den einzelnen Phasen auf. Dies liegt an der Sternpunktverschiebung am Verbraucher und der Tatsache, dass nicht Spannung und Strom an den Verbraucherwider-

ständen in den einzelnen Phasen gemessen werden. An dieser Stelle soll [16] mit folgendem Satz zitiert werden „Ein Mehrleitersystem ist mehr als die Summe der einzelnen Phasen“.

- Als **Wirk-Blindleistungshaushalt** oder **-Bilanz** eines MS-Netzes wird die Bilanz der im MS-Netz auftretenden Wirk- und Blindleistungsflüsse gemessen an der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators bezeichnet, d. h. die Summe des Wirk- und Blindleistungsverhaltens aller vorhandenen Verbraucher, EZA und Netzbetriebsmittel im MS-Netz. Auf Basis der heute installierten Messtechnik und Abrechnungspraxis werden üblicherweise 15-Minuten-Mittelwerte zugrunde gelegt.
- Über **Wirk-Blindleistungsdigramme** kann der Wirk-Blindleistungshaushalt von beliebigen Bezugspunkten (z. B. NVP zwischen Netzbetreibern, von MS-Betrieben bis hin zu einzelnen Haushalten) dargestellt werden. Die Abszisse zeigt dabei die Wirkleistung und die Ordinate die Blindleistung. Das Diagramm setzt sich aus zusammengehörigen Mess- oder Simulationswerten von Wirk- und Blindleistung zusammen. Dargestellt werden kann eine „Punktewolke“⁷ der Eingangsdaten, deren Einhüllende oder auch die Häufigkeit einzelner Arbeitsbereiche. Mit Hilfe der Wirk-Blindleistungsdigramme kann das Verhalten des Bezugspunktes zu verschiedenen Betriebszuständen (z. B. bei Schwachlast) beschrieben und mit zulässigen Blindleistungsgrenzwerten verglichen werden. Ein Beispiel zeigt Abbildung 2.7 in Abschnitt 2.3.2.
- Mit dem Begriff **Spannungshaltung** wird im Rahmen dieser Arbeit die statische Spannungshaltung verstanden. Der Begriff **statische Spannungshaltung** wird in Anlehnung an die beiden nachfolgenden Definitionen verwendet.

„Im Normalbetrieb wird durch die statische Spannungshaltung das zulässige Spannungsband eingehalten. Somit wird ein störungsfreier Betrieb der angeschlossenen Geräte ermöglicht.“ [17]

„Unter statischer Spannungshaltung ist die Spannungshaltung im Mittelspannungsnetz für den normalen Betriebsfall zu verstehen, bei der die langsamen Spannungsänderungen im Verteilungsnetz in verträglichen Grenzen gehalten werden.“ [18]

⁷Eine Punktewolke beschreibt ein XY-Diagramm mit eingezeichneten zusammengehörenden Wirk- und Blindleistungsmesswerten.

Die einzuhaltenden Grenzwerte für langsame Spannungsänderungen sind in DIN EN 50160 [19] definiert und beziehen sich auf 10-Minuten-Mittelwerte eines Wochenintervalls.

- Unter **Netzausbau** sind alle Maßnahmen zusammengefasst, über die Anpassungen am Stromnetz in Form von Optimierungen (z. B. Regelungskonzepte), Verstärkungen (z. B. Bündelleiter) und Neubauten (z. B. Verkabelung von Freileitungsabschnitten) vorgenommen werden.
- Der **Netzausbaubedarf** ergibt sich durch die Bewertung des Netzes bezüglich einzuhaltender Randbedingungen (z. B. Strom- und Spannungsgrenzen) unter Berücksichtigung aktueller und zukünftiger Belastungen durch Verbraucher und EZA.
- Als **Blindleistungsquellen** werden alle Anlagen bezeichnet, die induktive oder kapazitive Blindleistung gezielt bereitstellen können. Im Sinne dieser Arbeit sind dies netzbetreibereigene oder betriebliche Kompensationsanlagen BKA und blindleistungsfähige EZA. Als Blindleistungsquelle wird somit die „Gesamtanlage“, z. B. der Windpark oder der MS-Betrieb, also Netzelemente im Sinne der Definitionen nach Abbildung 2.1, verstanden.
- Blindleistungsquellen können aus mehreren **Blindleistungseinheiten** bestehen. Bei MS-Betrieben sind dies z. B. einzelne Kompensationsanlagen oder Wechselrichter.
- Der **Blindleistungsabruf** beschreibt eine bewusst initiierte Änderung des Blindleistungsverhaltens einer Blindleistungsquelle, deren induktives oder kapazitives Blindleistungspotenzial teilweise oder komplett abgerufen wird.
- Das **Blindleistungspotenzial** einer Blindleistungsquelle beschreibt deren Möglichkeit ihr aktuelles Blindleistungsverhalten am NVP zu verändern. Es wird zwischen induktivem und kapazitivem Potenzial differenziert. Die Netzrestriktionen (Strom- und Spannungsgrenzen) aus Sicht des MS-Netzes sind hierbei nicht berücksichtigt. Induktives Potenzial besteht beispielsweise, wenn Stufen von BKA abgeschaltet werden können, kapazitives durch Zuschaltung aktuell nicht verwendeter Stufen einer BKA.
- Die **Blindleistungsfähigkeit** oder der **Blindleistungsbereich** einer Blindleistungsquelle beschreibt deren technische Grenzen hinsichtlich der Blindleistungsbereitstellung. Die Anforderungen an die Blindleistungsfähigkeit von z. B. EZA werden in Abschnitt 2.2.3 beschrieben.
- Die **Steuerparameter** für den Blindleistungsabruf beschreiben, die Verteilung und maximal zulässige Höhe eines Blindleistungsabrufs. Sie werden im Rahmen der Netzplanung ermittelt. Der tatsächliche Blindleistungsabruf

findet im Rahmen der Netzführung statt. Der Begriff Steuerparameter wird gewählt da unabhängig von einem steuerungs- und regelungstechnischen Ansatz die Steuerparameter immer auf die Steuergröße zwischen Regler und Stellglied wirken.

- Mit **betrieblichen Kompensationsanlagen** werden in dieser Arbeit primär konventionelle Kompensationsanlagen bezeichnet, die typischerweise aus mehreren verdrosselten Einzelstufen bestehen. Jede Stufe ist i. d. R. aus einer Spule und einem Kondensator aufgebaut. Die Resonanzfrequenz ist so gewählt, dass diese unter der niedrigst vorkommenden Harmonischen liegt. Unter der Resonanzfrequenz wirkt die Stufe kapazitiv und kompensiert so den induktiven Blindleistungsbedarf von z. B. Motoren oder Drosselspulen von Leuchtmitteln. Eine ausführliche Erläuterung enthält Abschnitt 2.5.
- **MS-Betriebe** sind Verbraucher mit gewerblichem oder industriellem Charakter, deren NVP in der MS-Ebene liegt. I. d. R. besitzen MS-Betriebe ein eigenes MS-Netz und eigene MS/NS-Transformatoren.

Im Zuge der Erstellung dieser Arbeit wurde festgestellt, dass es verschiedene Interpretationen von Begriffen aus dem Bereich des Stromnetzaufbaus bzw. der Stromnetzsimulation gibt. Dies wurde zum Anlass genommen, die in Abbildung 2.1 visualisierten und im Folgenden beschriebenen Definitionen vorzunehmen.

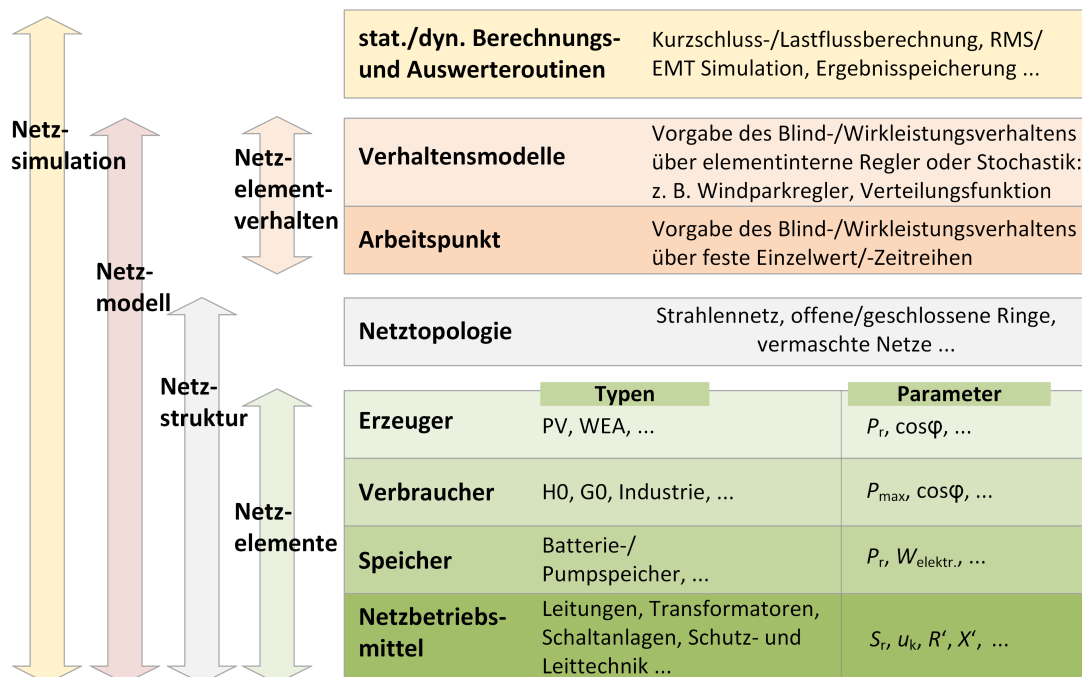


Abbildung 2.1: Begriffsdefinitionen aus dem Bereich des Stromnetzaufbaus bzw. der Stromnetzsimulation.

- Simulationen verwenden Modelle, um Experimente an Objekten durchführen zu können. In Bezug auf **Netzsimulationen** sind Experimente gleichzusetzen mit z. B. der Bewertung der Spannungshaltung oder von Kurzschlussströmen. Im Sinne der Systemtheorie werden im Zuge der Experimente Zustandsgrößen (z. B. Spannung) des Systems (Netzes) erfasst und ausgewertet. Zur Durchführung der Simulation stehen Softwareumgebungen (z. B. PowerFactory der Firma DIgSILENT) zur Verfügung, über die die Randbedingungen des zu untersuchenden Szenarios und das Modell vorgegeben werden.
- Das **Netzmodell** repräsentiert eine mathematische Beschreibung (z. B. Lastflussgleichungen) des zu untersuchenden Netzes und macht dieses berechenbar (analytisch oder approximiert). Es stellt eine Vereinfachung dar, enthält aber alle relevanten Objekteigenschaften. Ein Modell hat eine innere Struktur, die „Netzstruktur“. In der Systemtheorie beschreibt ein Modell ein System bzw. dessen Eigenschaften, das wiederum aus einzelnen Elementen besteht. Neben der Netzstruktur, die die Lagebeziehungen der Netzelemente und deren Elementparameter beschreibt, enthält das Netzmodell zusätzlich das Verhalten der Netzelemente („Netzelementverhalten“).
- Das **Netzelementverhalten** beschreibt das für die Simulation elektrisch relevante Verhalten eines Netzelements. Hierzu zählt z. B. dessen Wirk- und Blindleistungsverhalten (bzw. analoge Größen), aber auch technische Parameter, wie z. B. die Stufenschalterposition eines Stelltransformators. Unterschieden werden „feste“ Arbeitspunkte und netzzustandsabhängige Verhaltensmodelle. Arbeitspunkte werden statisch oder über Zeitreihen vorgegeben. Verhaltensmodelle stellen den Arbeitspunkt abhängig von Zustandsgrößen des Netzes (z. B. der Spannung) ein. Zum Einsatz kommen hier u. a. Kennlinien. Verhaltensmodelle bilden somit i. d. R. Regeleinrichtungen⁸ nach.
- Im Rahmen dieser Arbeit wird unter dem Begriff **Netzstruktur** die Netztopologie um weitere Informationen ergänzt. Die Netzstruktur enthält neben der Lageinformation aus der Netztopologie alle Informationen zu den Netzelementen (Typ und Betriebsmittelparameter).
- Der Begriff **Netzelemente** fasst die Netzbetriebsmittel, die das Stromnetz aufbauen und die daran angeschlossenen „Kundenanlagen“ inklusive deren Typen und Elementparametern zusammen.

⁸Typische Regeleinrichtungen in MS-Netzen sind die Spannungsblindleistungsregelung durch EZA oder die Stufenschalterregelung des HS/MS-Transformators.

- **Netzbetriebsmittel** sind grundsätzlich alle im Besitz des Netzbetreibers befindlichen Einrichtungen zur Aufrechterhaltung des Netzbetriebs. Hierzu zählen u. a. Leitungen, Schaltanlagen, Transformatoren, Kompensationsanlagen und Schutzgeräte.
- **Speicher**, z. B. Batterie- oder Pumpspeicher, sind Anlagen, über die elektrische Energie aufgenommen und zeitversetzt wieder abgegeben werden kann.
- **Verbraucher** sind Anlagen, die elektrische Energie aufnehmen. Dies sind z. B. Haushalte oder Betriebe mit Anschluss in der MS-Ebene.
- **Erzeuger** sind Anlagen wie z. B. Photovoltaikanlage (PV) oder Windenergieanlagen (WEA), die primär elektrische Energie an das Netz abgeben. EZA können allerdings auch elektrische Energie beziehen (z. B. WEA bei Windflaute zur Eigenbedarfsdeckung), deren Höhe allerdings deutlich geringer ausfällt als die Einspeiseleistung.
- **Mischanlagen** sind Anlagen, die weder reine Speicher, Verbraucher oder Erzeuger sind, sondern ein Mischverhalten besitzen (z. B. Haushalte mit PV). I. d. R. werden heute Mischanlagen durch einzelne „reine“ Netzelemente in der Netzstruktur dargestellt, um die Beschreibbarkeit im Netzmodell zu vereinfachen. Zukünftig wird es allerdings unumgänglich sein, neue Elementtypen zu definieren, da z. B. Konstrukte wie Hausenergiemanagementsysteme, die eine Optimierung zwischen Haushaltsverbrauch, Heimspeicher und E-Fahrzeugladung vornehmen, so nicht mehr abbildbar sind.
- Die **Netztopologie** beschreibt den „geografischen“ Aufbau eines Netzes, d. h. in welcher Form die einzelnen Netzelemente miteinander elektrisch verbunden sind. Im Sinne der Graphentheorie, die oft bei Optimierungsproblemen in Bezug auf den Leitungsneubau angewendet wird (z. B. [20]), setzt sich die Topologie aus Knoten (z. B. Sammelschienen von Schaltanlagen) und Zweigen (z. B. Leitungen) zusammen. Die Schaltungstopologie in Bezug auf die Elektronik sagt dabei nichts über die Dimensionierung der „Bauteile“ oder deren Typ aus. Somit enthält die Netztopologie im Sinne dieser Arbeit noch keine Betriebsmittelparameter (z. B. Leitungslänge oder Bemessungsleistung). Eine typische Topologie von MS-Netzen ist der Betrieb mit offenen Ringen. Beobachtet⁹ werden kann ein Trend zu geschlos-

⁹Die Beobachtung stammt aus Gesprächen mit Netzbetreibern sowie Netzanalysen im Rahmen des Forschungsprojektes [2].

senen Ringen und Teilvermaschungen. Die zu untersuchende Netztopologie wird i. d. R. grafisch¹⁰ in der Simulationsumgebung dargestellt.

- Unter **Betriebsverhalten/Arbeitspunkt** z. B. einer EZA, Last oder eines MS-Netzes wird das aktuell betrachtete eingeschwungene Wirk- und Blindleistungsverhalten des jeweiligen Elements verstanden. Wirk- und Blindleistungszeitreihen stellen somit eine Aneinanderreihung von Arbeitspunkten mit diskreter Schrittweite dar.
- **Berechnungs- und Auswerteroutinen** sind Teil der Simulationsumgebung, über die analytisch oder numerisch die Modellgleichungen gelöst und die Ergebnisse ausgegeben bzw. visualisiert werden. Bekanntestes Beispiel ist die Lastflussberechnung mittels Newton-Raphson-Verfahren, das im Anhang A.5 erläutert wird.

2.2 Diskussion des Ordnungsrahmens und von Regelwerken

Die Stromversorgung zählt in Deutschland seit dem 20. Jahrhundert mit zu den wichtigsten Infrastrukturen, weshalb sie besonderen rechtlichen Randbedingungen unterliegt. Die für diese Arbeit ausgewählten relevanten Gesetze und Verordnungen sowie anerkannte Regeln der Technik werden im Folgenden vorgestellt und diskutiert. Es ist dabei zu beachten, dass die nachfolgenden Abschnitte aufeinander aufbauen und somit in chronologischer Reihenfolge zu lesen sind.

2.2.1 Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung

Im Folgenden werden die für diese Arbeit wichtigsten Auszüge aus dem EnWG [8] diskutiert.

¹⁰Die Netztopologie kann geografisch korrekt z. B. durch Nutzung von Geoinformationssystem (GIS) oder schematisch dargestellt werden.

§ 1 EnWG

Das Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz) (EnWG) [8] definiert die Basis für die Ausgestaltung der Elektrizitäts- und Gasversorgung in Deutschland. § 1 Abs. 1 EnWG beschreibt den Zweck des Gesetzes:

„Zweck des Gesetzes ist eine möglichst sichere, preisgünstige, verbraucherfreundliche, effiziente und umweltverträgliche leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit Elektrizität und Gas, die zunehmend auf erneuerbaren Energien beruht.“

Eine Konkretisierung erfolgt in § 1 Abs. 4 EnWG:

„Um den Zweck des Absatzes 1 auf dem Gebiet der leitungsgebundenen Versorgung der Allgemeinheit mit Elektrizität zu erreichen, verfolgt dieses Gesetz insbesondere die Ziele,

1. die freie Preisbildung für Elektrizität durch wettbewerbliche Marktmechanismen zu stärken,
2. den Ausgleich von Angebot und Nachfrage nach Elektrizität an den Strommärkten jederzeit zu ermöglichen,
3. dass Erzeugungsanlagen, Anlagen zur Speicherung elektrischer Energie und Lasten insbesondere möglichst umweltverträglich, netzverträglich, effizient und flexibel in dem Umfang eingesetzt werden, der erforderlich ist, um die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Elektrizitätsversorgungssystems zu gewährleisten, und
4. den Elektrizitätsbinnenmarkt zu stärken sowie die Zusammenarbeit insbesondere mit den an das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland angrenzenden Staaten sowie mit dem Königreich Norwegen und dem Königreich Schweden zu intensivieren.“

Allein die Forderung nach einer sicheren und zugleich preisgünstigen Stromversorgung zeigt, wie komplex die in § 1 Abs. 1 EnWG geforderte Zielsetzung ist. Für das Übertragungsnetz und für die HS-Ebene werden Netzentwicklungspläne erarbeitet, die mit der Bundesnetzagentur (BNetzA) abzustimmen sind. Hierbei werden szenarienbasiert (Entwicklung der Lasten und EZA) der notwendige Netzausbaubedarf unter Berücksichtigung definierter Lösungsbausteine (z. B. Netzverstärkungen durch Leitungsneubauten, Freileitungsmonitoring, Hochspannungsgleichstrom-Übertragung (HGÜ)-Korridore) bestimmt. Primär werden hierbei

die Wirkleistungsflüsse nachgebildet, die den Netzausbaubedarf dominieren. Die Blindleistungsflüsse hingegen werden selbst hier nur vereinfacht nachgebildet. So besitzt z. B. das Netzmodell des Netzentwicklungsplans 2014 an fast allen Übergabepunkten zur HS-Ebene feste $\cos\varphi$ -Werte, mit durchwegs induktivem Verhalten. In der Realität kommt es jedoch durchaus auch zu kapazitivem Verhalten und entsprechenden spannungsanhebenden Effekten. Eine aus mathematischer Sicht optimale Lösung wird bei dieser szenarienbasierten Vorgehensweise bekanntermaßen nicht gefunden, da zum einen jedes Szenario unter Umständen eine andere Lösung besitzt und zudem qualitative Größen wie die Umweltverträglichkeit nur indirekt (z. B. über den Flächenverbrauch einer Lösung) einbezogen werden können. Im Verteilungsnetz und dort vor allem in der MS- und NS-Ebene prägt sich dieses Problem weiter aus, da die derzeitige Planung deutlich rudimentärer vonstatten geht als in den überlagerten Spannungsebenen. Berücksichtigt man, dass es sich um Prognosen hinsichtlich der Netzentwicklung handelt, so ist es irrelevant, die exakte mathematisch optimale Lösung zu finden, da das entsprechende Szenario nicht zwangsläufig eintritt. Vielmehr muss im Rahmen der Netzplanung eine robuste Strategie erarbeitet werden, die sich flexibel an die Netzentwicklung anpassen lässt. In diesem Sinne soll diese Arbeit einen Beitrag dazu liefern, das Blindleistungspotenzial einzelner MS-Netze bedarfsabhängig zu nutzen.

Bezugnehmend auf die nach § 1 Abs. 1 EnWG grundlegend einzuhaltenden Randbedingungen soll nun kurz der Inhalt dieser Arbeit qualitativ diskutiert werden:

- **sicher:** Der Einsatz dieses Verfahrens unterstützt die Einhaltung von Blindleistungsgrenzen zwischen Netzbetreibern und somit die Spannungshaltung im vorgelagerten Netz. In der Vergangenheit konnte der Blindleistungsbedarf vor allem durch Blindleistung aus konventionellen Großkraftwerken kompensiert werden, jedoch nimmt deren Verfügbarkeit aufgrund des Einspeisevorrangs von erneuerbaren EZA stetig ab. Da Blindleistungsgrenzen zum heutigen Stand oftmals verletzt werden, ist zu erwarten, dass die Anwendung dieses Verfahrens nicht nur zu einer Beibehaltung der aktuellen Netzsicherheit führt, sondern diese verbessert.
- **preisgünstig:** Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist nicht Bestandteil dieser Arbeit, weshalb keine quantitativen Aussagen gemacht werden können. Jedoch wird unterstellt, dass durch das Steuerungsverfahren der Blindleistungseinsatz und die Blindleistungsvorhaltung durch eine technologieoffene

Bewertung und bedarfsgerechtere Planung aus volkswirtschaftlicher Sicht günstiger sind. Zudem werden neue, bislang unerschlossene Blindleistungsquellen verfügbar und erhöhen letztendlich die Akteursvielfalt, was bei einer zukünftig denkbaren marktbasierten Blindleistungsbeschaffung¹¹ von Vorteil ist. Anzumerken ist, dass bei einer sinnvollen Wirtschaftlichkeitsbewertung nicht nur die Blindleistungsbeschaffung an sich, sondern als konkurrierende Lösungsansätze auch die verfügbaren Maßnahmen des Netzausbaus (primär Spannungshaltungskonzepte) betrachtet werden müssen.

- **verbraucherfreundlich:** Bezieht man die Verbraucherfreundlichkeit auf alle am Stromnetz angeschlossenen Kundenanlagen, Verbraucher als auch Erzeugungsanlagen, so ergeben sich verschiedene Aspekte. Durch das Verfahren wird der Blindleistungseinsatz und mittelfristig durch Rückkopplung der Steuerungsparameter in der Netzplanung die Blindleistungsvorhaltung optimiert, da Blindleistung bewusst eingesetzt bzw. vermieden wird. Hierdurch können Investitionen und Betriebskosten bei den Kunden reduziert werden, was vor allem aufgrund der derzeit geltenden TAR-Anforderungen (siehe Abschnitt 2.2.3) den EZA zugute kommen könnte. Zugleich besitzt der Netzbetreiber die Möglichkeit, das potenzielle Blindleistungsvermögen aller Kunden zu bewerten und ggf. zu nutzen, wodurch neue Geschäftsmodelle für diese entstehen können.
- **effizient:** Eine Effizienzsteigerung wird unterstellt, da bestehende Blindleistungspotenziale identifiziert und genutzt werden. Beispielsweise kompensieren Betriebe ihren Blindleistungsbedarf nicht mehr auf einen festen $\cos\varphi$ -Wert, sondern verhalten sich netzdienlich. Zudem wird der Blindleistungseinsatz nicht mehr pauschal, sondern netzspezifisch geplant, wodurch unnötiger Blindleistungseinsatz vermieden und der Neubau an Kompensationsanlagen reduziert wird. Darüber hinaus wird eine zyklische (z. B. bei Änderung der Netzstruktur oder pauschal jährlich¹²) Prüfung des Blindleistungseinsatzes durch wiederholtes Anwenden des Steuerungsverfahrens empfohlen, um unnötigen Blindleistungseinsatz zu vermeiden.
- **umweltverträglich:** Der bereits beschriebene effizientere Umgang mit Blindleistung kann den Zubau an neuen Kompensationsanlagen reduzieren, was letztendlich den Materialeinsatz für den Bau dieser Anlagen obsolet macht

¹¹Eine Vorstellung von Anforderungen und Gestaltungshinweisen eines marktbasierten Ansatzes beschreibt [21].

¹²Dabei sollten historische Werte bei gleicher Netztopologie mit berücksichtigt werden, da sich das Primärenergiedargebot von WEA und PV stark unterscheiden kann.

bzw. mindert. Hierdurch kann auf den Abbau, die Aufbereitung, den Transport und die Verarbeitung der entsprechenden Ressourcen verzichtet werden. Darüber hinaus wird die Spannungshaltung im vorgelagerten Netz verbessert, wodurch auch dort mit Einsparungen beim Netzausbau und den damit verbundenen Einflüssen auf die Umwelt gerechnet werden kann.

§ 17 und § 19 EnWG

Weitere relevante Auszüge aus dem EnWG sind § 17 und § 19. § 17 Abs. 1 EnWG verpflichtet Netzbetreiber dazu, Letztverbraucher (dies beinhaltet auch andere Netzbetreiber) zu technischen und wirtschaftlichen Bedingungen an ihr Netz anzuschließen. Nach § 19 Abs. 1 EnWG sind die dafür geltenden Mindestanforderungen des Netzbetreibers festzulegen und zu veröffentlichen:

„Betreiber von Elektrizitätsversorgungsnetzen sind verpflichtet, unter Berücksichtigung der nach § 17 festgelegten Bedingungen für den Netzanschluss von Erzeugungsanlagen, Anlagen zur Speicherung elektrischer Energie, Elektrizitätsverteilernetzen, Anlagen direkt angeschlossener Kunden, Verbindungsleitungen und Direktleitungen technische Mindestanforderungen an deren Auslegung und deren Betrieb festzulegen und im Internet zu veröffentlichen.“

Einschränkungen bzw. Randbedingungen zur Definition von technischen Mindestanforderungen sind weiter in § 17 Abs. 3, 4 und 5 EnWG definiert. Diese beiden Paragraphen bilden die rechtlichen Grundlagen für die Ausgestaltung der TAB bzw. TAR. Die TAR werden vom Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN) erarbeitet und beschreibt Mindestanforderungen, die jede Kundenanlage einhalten muss. Die TAB beinhaltet netzbetreiberspezifische Ergänzungen der TAR.

2.2.2 Niederspannungsanschlussverordnung

Die „Verordnung über allgemeine Bedingungen für den Netzanschluss und dessen Nutzung für die Elektrizitätsversorgung in Niederspannung“ [22] regelt die allgemeinen Bedingungen, zu denen Netzbetreiber „jedermann“ an ihr Niederspannungsnetz anzuschließen haben. Sie gilt nicht für den Netzanschluss von Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien. Wie eine selbst durchgeführte Recherche zeigt (z. B. die Veröffentlichung eines Netzbetreibers [23]), wird

die Niederspannungsanschlussverordnung (NAV) auch für in der MS-Ebene anzuschließende Verbrauchsanlagen verwendet (z. B. MS-Betriebe mit eigenem 20-kV-Netz), da es bislang kein Pendant für diese Spannungsebene gibt. § 16 Abs. 2 NAV regelt das zulässige Blindleistungsverhalten:

„Die Anschlussnutzung hat zur Voraussetzung, dass der Gebrauch der Elektrizität mit einem Verschiebungsfaktor zwischen $\cos\varphi = 0,90$ kapazitiv und $0,90$ induktiv erfolgt. Anderenfalls kann der Netzbetreiber den Einbau ausreichender Kompensationseinrichtungen verlangen.“

Darüber hinaus erlaubt § 20 NAV dem Netzbetreiber TAB festzulegen, um eine sichere und störungsfreie Versorgung sicherzustellen.

„Der Netzbetreiber ist berechtigt, in Form von Technischen Anschlussbedingungen weitere technische Anforderungen an den Netzanschluss und andere Anlagenteile sowie an den Betrieb der Anlage einschließlich der Eigenanlage festzulegen, soweit dies aus Gründen der sicheren und störungsfreien Versorgung, insbesondere im Hinblick auf die Erfordernisse des Verteilernetzes, notwendig ist. Diese Anforderungen müssen den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen. Der Anschluss bestimmter Verbrauchsgeräte kann in den Technischen Anschlussbedingungen von der vorherigen Zustimmung des Netzbetreibers abhängig gemacht werden. Die Zustimmung darf nur verweigert werden, wenn der Anschluss eine sichere und störungsfreie Versorgung gefährden würde.“

Zwischenfazit

Berücksichtigt man die Problematik hinsichtlich der Einhaltung von Grenzwerten der Blindleistungsbilanz von Verteilungsnetzen und die aktuellen Anforderungen an die Blindleistungsfähigkeit zur Spannungshaltung von EZA (siehe Abschnitt 2.2.3), so erscheint es ineffizient, auf das Blindleistungspotenzial von Verbrauchern zu verzichten. Dies wird beispielsweise bei Betrieben der Chemieindustrie ersichtlich. Diese besitzen i. d. R. eine hohe Grundlast und somit aufgrund der Korrelation von Wirk- und Blindleistung und der Tatsache, dass auch Wechselrichter bei Betrieben Blindleistung bereitstellen könnten, ein durchgängiges Blindleistungspotenzial. Zusammen mit Blindleistung aus EZA und anderen Blindleistungsquellen ist so eine hohe zeitliche Verfügbarkeit des gesamten Blindleistungspotenzials aller Blindleistungsquellen einer Netzgruppe zu erwarten. Entscheidend ist hierbei meist nicht die durchgängige, im Sinne einer zeitlich ununterbrochenen Verfügbarkeit, sondern primär die Korrelation des Potenzials mit dem Blindleistungsbedarf.

Basierend auf dieser Überlegung wird eine einheitliche und pauschale Kompensationsvorgabe für Verbraucher (hierunter sind auch Verteilungsnetze zu verstehen) und ein zunehmender Anforderungskatalog an die Blindleistungsfähigkeit an EZA in den nächsten Abschnitten weiter hinterfragt.

2.2.3 Technische Anschlussbedingungen

Im Folgenden werden die Anforderungen für den Anschluss von Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen in der jeweiligen Spannungsebene anhand ausgewählter relevanter Regelwerke erläutert und abschließend im Zuge dieser Arbeit aufgetretene Fragestellungen diskutiert. Hierbei handelt es sich, um eine Augenblicksaufnahme aus dem Jahr 2017, die die Bezugsbasis für diese Arbeit bildet. Die bis zur Veröffentlichung dieser Arbeit stattgefundenen Weiterentwicklungen der Regelwerke (vor allem der Neuregelung der VDE-AR-N 4105 und VDE-AR-N 4110) führen nach Einschätzung des Autors zudem zu keinen grundlegenden Änderungen des am Ende dieses Abschnitts formulierten Fazits und der darüber abgeleiteten Anforderungen.

Deutsche Regelwerke für Erzeugungsanlagen

Im Zuge der Energiewende wurde erkannt, dass es in der HS-Ebene zu deutlichen Spannungsanhebungen durch die zunehmende Einspeisung von WEA kommt. Begründet mit dem oftmals genannten „Verursacherprinzip“¹³ wurde u. a. die Spannungsblindleistungsregelung durch die aktive Blindleistungsbereitstellung von EZA mit der für WEA geltenden Verordnung SDLWindV [24] als Alternative zu Netzausbaumaßnahmen des Netzbetreibers eingeführt. Mit der MS-Richtlinie [18] des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) bzw. der VDE-AR-N 4110 [25] sowie der NS-Richtlinie [26] des BDEW wurden die Anforderungen sukzessive energieträgerunabhängig in die MS- und NS-Ebene ausgeweitet¹⁴.

Die Vorgaben zur Blindleistungsfähigkeit für Erzeugungsanlagen mit Anschluss in der NS- und MS-Ebene sind wirkleistungsabhängig¹⁵ und gelten ab einer definier-

¹³Die Einspeisung der EZA führt zu einer Anhebung der Spannung, weshalb sie einen Beitrag in Form der Blindleistungsbereitstellung leisten sollen, um den Spannungshub zu reduzieren.

¹⁴Ein zeitlicher Verlauf bis zum Jahr 2014 kann dem Konferenzbeitrag [27] entnommen werden.

¹⁵In den Diskussionen der zuständigen Arbeitsgruppe des Verbands der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE) zur Weiterentwicklung der Anwenderregeln wird auch eine wirkleistungsunabhängige zukünftige Blindleistungsbereitstellung diskutiert. Die „trichterförmige“ Ausprägung der geforderten $\cos\varphi$ -Grenzen der Blindleistungsfähigkeit ist

ten Mindesteinspeisung. Unter diesem Grenzwert gelten analog zu Verbrauchsanlagen Blindleistungsgrenzwerte. Typische Anforderungen in der NS- und MS-Ebene sind eine Blindleistungsbereitstellung bis zu einem $\cos\varphi = 0,90$ oder $0,95$, der i. d. R. mittels Kennlinien (z. B. $\cos\varphi(P)$ oder $Q(U)$) gesteuert wird. Netzbetreiberspezifische Abweichungen sind dabei prinzipiell unter Beachtung von § 17 EnWG, § 19 EnWG sowie § 20 NAV erlaubt, weshalb i. d. R. jeder Netzbetreiber Ergänzungen zu den „allgemeinen“ BDEW- bzw. VDE-Anschlussbedingungen veröffentlicht. Die Ergänzung [28] enthält beispielsweise für die MS-Ebene erweiterte Anforderungen an die induktive Blindleistungsfähigkeit von EZA ($\cos\varphi = 0,90$ anstelle von $0,95$). Die symmetrische Erweiterung der Blindleistungsgrenzen war auch Bestandteil der Diskussion zur Ausgestaltung der VDE AR-N 4110 [25] in der zuständigen VDE-Arbeitsgruppe. Im Entwurf wird im Gegensatz zur vormals gültigen BDEW-MS-Richtlinie [18] pauschal ein minimaler $\cos\varphi = 0,90$ von EZA gefordert (vormals $0,95$), was seitens der Anlagenhersteller Widerstand nicht befürwortet wurde. In der finalen Version wird ein $\cos\varphi = 0,95$ gefordert und zudem die Möglichkeit einer Wirkleistungsreduktion zugunsten der Blindleistungsbereitstellung eingeräumt, um die blindleistungsbedingte Überdimensionierung der Anlagen zu reduzieren. Für die HS- und HöS-Ebene definiert die VDE-AR-N 4120 [1] und der TransmissionCode 2007 [29] die Anforderungen an EZA. Hierbei sind verschiedene Varianten möglich, die unsymmetrische $\cos\varphi$ -Grenzwerte für die induktive und kapazitive Blindleistungsbereitstellung vorsehen. Der Minimalwert liegt auch hier bei einem $\cos\varphi = 0,90$.

Deutsche Regelwerke für Verbrauchsanlagen

In der MS- und NS-Ebene werden Regelwerke differenziert für Verbrauchsanlagen (im Sinne des EnWG sind dies auch unterlagerte Netze) erstellt. Die Basis bilden wiederum BDEW-Richtlinien¹⁶ [30, 31], die von den Netzbetreibern ergänzt werden können (z. B. [32]). Typische einzuhaltende Grenzwerte sind ein minimaler $\cos\varphi = 0,90$ (unabhängig von kapazitivem oder induktivem Verhalten). Um diesen Grenzwert sicherstellen zu können, ist der Anschlussnehmer dazu verpflichtet, geeignete Kompensationsanlagen zu errichten. In der HöS- und HS-Ebene gelten für Verbrauchsanlagen die gleichen Regelwerke wie für EZA. Diese sind die VDE-AR-N 4120 [1] und der TransmissionCode 2007¹⁷ [29]. Im Gegensatz zu den niedrigeren Spannungsebenen, wird in VDE-AR-N 4120 [1] das zulässige Blindleistungsverhalten stärker begrenzt. Das kapazitive Verhalten ist

ein erster Schritt in diese Richtung.

¹⁶Die BDEW-Richtlinien sind zwischenzeitlich durch TAR ersetzt worden.

¹⁷Zwischenzeitlich durch VDE-AR-N 4130 abgelöst.

nur noch maximal in Höhe von 5 % der vereinbarten Anschlusswirkleistung P_{AV} zulässig (ein $\cos\varphi = 0,90$ würde ca. 50 % erlauben). Das induktive Verhalten wird ebenfalls auf 5 % von P_{AV} bei Arbeitspunkten $P \leq 0,15 \cdot P_{AV}$ begrenzt, darüber wird ein $\cos\varphi = 0,95$ gewährt. Das entsprechende Betriebsgrenzendiaagramm ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Für den Anschluss an die HöS-Ebene sieht der Transmission Code 2007 [29] bilateral vertraglich abgestimmte Regelungen des Blindleistungsaustausches vor. Wird davon nicht Gebrauch gemacht, so ist ein minimaler $\cos\varphi = 0,95$ einzuhalten.

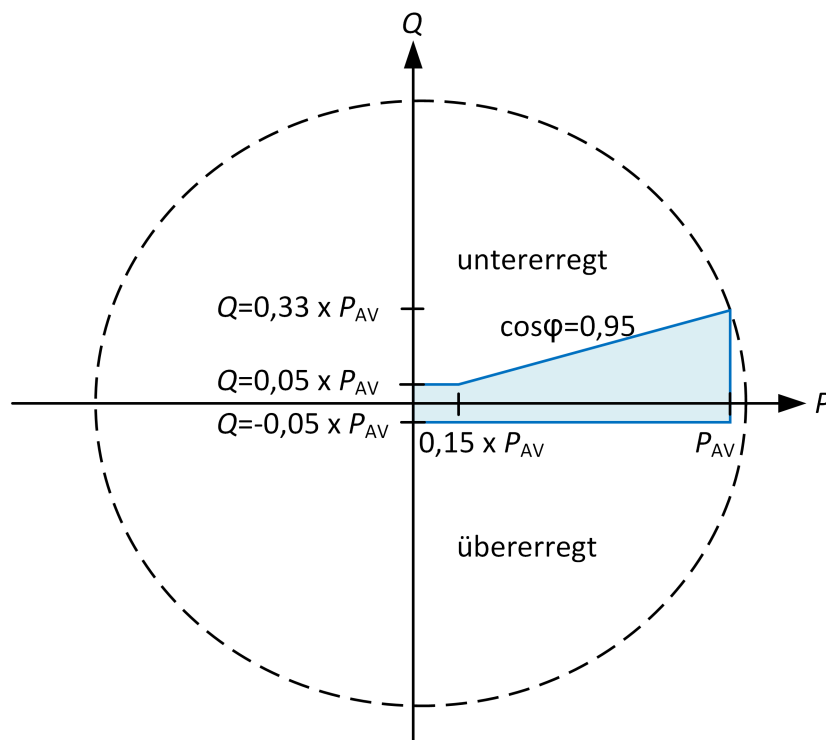


Abbildung 2.2: Betriebsgrenzendiaagramm für Verbraucher mit Anschlusspunkt in der HS-Ebene nach [1].

Europäische Regelwerke für EZA und Verbrauchsanlagen

Auch auf europäischer Ebene gibt es Bemühungen die Anforderungen an das Blindleistungsverhalten von Erzeugungs- (Requirements for Generators (RFG) [33]) und Verbrauchsanlagen (Demand Connection Code (DCC) [34]) für einen Anschluss im HöS-Netz in den Mitgliedsländern des European Network of Transmission System Operators for Electricity (entso-e) zu vereinheitlichen. EZA werden hierbei in verschiedene Kategorien (nach Anlagentyp¹⁸, Nennleistung und

¹⁸Synchrongeneratoren, Offshore-Anlagen und Anlagen mit nicht-synchron laufenden Generatoren.

Anschlusspunkt¹⁹ im entso-e-Netz) unterteilt. Die Anforderungen an die Blindleistungsfähigkeit werden nur indirekt über die Festlegung maximal zulässiger Grenzwerte von $U \cdot Q / P_{max}$ -Flächen definiert. Dieser Bereich ist EZA-spezifisch ausgestaltbar und fordert minimal einen $\cos\varphi = 0,83$. Auf Verbraucherseite, hierzu zählen auch Verteilungsnetze, war der Entwurf des DCC [35] Artikel 15 (2) stark umstritten, da dieser forderte, dass sich Verteilungsnetze blindleistungsneutral bei Betriebspunkten unter 25 % des maximalen Leistungsbezugs am Übertragungsnetzanschluss zu verhalten haben. U. a. auf Druck des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und der VNB wurde diese Formulierung in der aktuellen Fassung [34] abgeschwächt. Diese beinhaltet, dass VNB und Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) gemeinsam eine positiv ausfallende Kosten-Nutzen-Analyse durchführen müssen, um diese mögliche Forderung des ÜNB zu begründen. Oberhalb einer Leistungsaufnahme von 25 % ist das Blindleistungsverhalten von Verbrauchsanlagen und Verteilungsnetzen auf einen $\cos\varphi = 0,90$ zu begrenzen²⁰.

Anmerkung

Darauf hinzuweisen ist, dass mittels bilateraler Verträge zwischen Netzbetreiber untereinander oder mit Verbrauchsanlagen und EZA anderweitige Anforderungen an das Blindleistungsverhalten möglich sind. Weiter ist anzumerken, dass die hier aufgeführten Anschlussbedingungen nicht im Zusammenhang mit der Blindenergieabrechnung („Entschädigung für Netzverluste durch Blindleistungsflüsse“) zu sehen sind, da es prinzipiell nicht die Möglichkeit gibt, sich von der Einhaltung der festgelegten Grenzwerte und Anforderungen freizukaufen (siehe BNetzA-Beschluss [36], der im nächsten Absatz diskutiert wird). Vielmehr basieren diese Bedingung auf der in § 17 EnWG definierten Anschlusspflicht unter Berücksichtigung der in § 1 Abs. 1 EnWG formulierten Zielsetzung, zu deren Erfüllung der Netzbetreiber technische Anschlussbedingungen erlässt.

Zwischenfazit

Die heutige Praxis mit vorwiegend einheitlichen Grenzwerten für verschiedene NVP und bilanziellen Bewertungen über mehrere NVP hinweg²¹ zeigt, dass das Blindleistungsverhalten von Netzen nicht bedarfsgerecht (z. B. aus Gründen der

¹⁹z. B. Kontinentaleuropa

²⁰Im DCC [34] werden Blindleistungsgrenzwerte u. a. über die Angabe von Werten für den Leistungsfaktor beschrieben, der Verschiebungsblindleistung und Verzerrungsblindleistung berücksichtigt. Der Kontext in Bezug auf Blindleistungsaufnahme und -abgabe lässt allerdings den Schluss zu, dass der Verschiebungsfaktor $\cos\varphi$ gemeint ist.

²¹Die Bilanzierung ist bei örtlich eng zusammenliegenden NVP ggf. tolerierbar.

Spannungshaltung), sondern pauschal eingeengt wird. Derzeit unberücksichtigt ist auch das Verhalten von Mischanlagen, d. h. Anlagen mit Verbrauch und Erzeugung. Aktuell gelten für diese widersprüchliche Regelungen. Ein MS-Betrieb mit PV-Anlage muss beispielsweise die Blindleistungsgrenzen für Verbraucher nach [31] und für EZA nach [18] einhalten. D. h. einerseits sollte er seinen induktiven Blindleistungsbedarf beschränken und gleichzeitig induktive Blindleistung zu Zwecken der Spannungshaltung beziehen, was zu Konflikten bei der Regelung der Einzelkomponenten (PV-Wechselrichter und Blindleistungskompensationsanlage) führen kann. Auch für einzelne Netzgruppen mit signifikanter installierter Last- und Erzeugungsleistung ist die Einhaltung der Blindleistungsgrenzen im Bereich des Wirkleistungsnulldurchgangs der Wirk-Blindleistungsbilanz schwierig, da die auf $\cos\varphi$ -Werten basierenden Grenzen hier gegen null gehen und damit Grenzwertüberschreitungen systematisch werden. Zweckmäßiger wären hier Blindleistungsfreibereiche, wie sie z. B. in [37] andiskutiert werden. Näher wird auf diese Thematik in Abschnitt 2.3.2 am Beispiel eines MS-Netzes eingegangen.

All dies wirft die Frage auf, in welchem Umfang ein Netzbetreiber die anerkannten Regeln der Technik (z. B. [1]) erweitern darf. Ein aktuelles Beispiel zeigt der Beschluss der BNetzA [36], indem das zulässige Blindleistungsverhalten eines 110-kV-Windparks Gegenstand ist. Im Fokus steht dabei der Bezugsfall, d. h. das Verhalten der Windparks bei Windflaute. Hier werden seitens des Netzbetreibers die für Verbraucher geltenden Anforderungen herangezogen. Die netzbetreiberspezifische Ergänzung sieht dabei ein Verbot des kapazitiven Verhaltens vor, wodurch dem Winparkbetreiber Pönalen drohen. Im Beschluss verweist die BNetzA auf die in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Rechte und Pflichten des Netzbetreibers und auf die Rolle der anerkannten Regeln der Technik, mit Hinweis auf VDE-AR-N 4120 [1]. Eine netzbetreiberspezifische Ergänzung ist grundsätzlich möglich, muss aber technisch und wirtschaftlich nach § 17 (1) EnWG begründbar sein, was in diesem Fall nicht vom Netzbetreiber nachzuweisen war. Somit konnte keine Pönale erhoben werden. Auch die Erhebung einer „Blindenergie-Pönale“ über die Netzentgelte ist laut Ansicht der BNetzA nicht zulässig, da dies die Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV) nicht vorsieht. Dies wird damit begründet, dass die Pönale nicht den Charakter eines finanziellen Ausgleichs für eine reguläre Netznutzung besitzt, sondern als disziplinierende Maßnahme für eine unzulässige Netznutzung (d. h. einem Verhalten, das nicht konform zu den technischen Mindestanforderungen ist) angesehen wird.

Das gezeigte Beispiel beantwortet nicht die Frage, wie sinnvolle technische Anforderungen definiert werden, zeigt aber die Notwendigkeit sich dieser Fragestellung zu stellen. Vor allem für EZA erweitern sich zunehmend die von ihnen zu übernehmenden Aufgaben (z. B. bei der Systemdienstleistungserbringung) und die damit verbundenen technischen Anforderungen. Hierbei muss allerdings mit Maß und Ziel vorgegangen werden, um der Vorgabe einer preisgünstigen und sicheren Versorgung nach § 1 Abs. 1 EnWG gerecht zu werden. Vor allem das einleitend genannte „Verursacherprinzip“ als Begründung für die Blindleistungsvorhaltung von EZA sollte stark hinterfragt werden, da es zum einen nicht an jeder EZA im gleichen Umfang (EZA mit Anschlusspunkt an einer geringen Netzimpedanz verursachen nur geringe Spannungsanhebung) vorliegt und da durch die kapazitive Blindleistungsbereitstellung auch verstärkende Effekte (Spannungsanhebung) ermöglicht werden. Hinzu kommt die unsymmetrische Behandlung von Verbrauchsanlagen und EZA, da Verbrauchsanlagen nur auf einen geringeren induktiven Bedarf kompensieren, d. h. es wird keine vollständige bzw. keine Überkompensation verlangt, wie es bei den EZA der Fall ist. Im Auftrag des BMWi wurde die Studie [9] mit dem Titel „Zukünftige Bereitstellung von Blindleistung und anderen Maßnahmen für die Netzsicherheit“ erstellt, bei der auch der Verfasser dieser Arbeit mitgewirkt hat. Im Fokus steht die heutige Blindleistungsbeschaffungspraxis und die Frage nach einer zukünftigen volkswirtschaftlicheren Lösung. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die heutige richtlinienbasierte Beschaffung hinsichtlich der volkswirtschaftlichen Kosten ineffizient ist, da

- sie als Blindleistungsquellen primär EZA fokussiert,
- der für das Übertragungsnetz maximal nutzbare Kompensationsbeitrag der EZA aus dem Übertragungsnetz einschließlich der in der HS- und HS/MS-Ebene angeschlossenen Anlagen lediglich bei 30 % des Gesamtblindleistungsbedarfs (wirkleistungsabhängige Blindleistungsbereitstellung unterstellt) liegt. Bei zukünftig steigender installierter Leistung ist der prozentuale Beitrag sogar weiter rückläufig,
- durch die geltenden Richtlinien die Spannungsblindleistungsregelung als kostenfreies Sonderwerkzeug verfügbar ist und somit nicht im Wettbewerb mit anderen Technologien zur statischen Spannungshaltung steht und
- die richtlinienbasierte Beschaffung eine Konkurrenz unter Blindleistungsquellentypen behindert.

Es wird daher in [9] eine Systemumstellung empfohlen, bei der unter anderem ein marktbasiertes Beschaffungsmodell für Blindleistung enthalten ist. Ein ent-

sprechendes Modell, das auch Kosten für die richtlinienbasierte Blindleistungsbereitstellung berücksichtigt, wird skizziert. Blindleistungspotenziale auf Verbraucherseite werden angesprochen, die im Zuge einer marktbasierten Beschaffung effizienter genutzt werden könnten, so die Studie.

Aus Sicht des Autors dieser Arbeit besteht die Begründung von Blindleistungsgrenzen am NVP zwischen Netzbetreibern primär in der Sicherstellung der statischen Spannungshaltung und der dabei einzuhaltenden Grenzwerte (siehe z. B. DIN EN 50160 [19]) im vorgelagerten Netz. Hierfür muss die Netzplanung auf Planungswerte (z. B. vereinbarte maximale Übertragungsleistung oder Blindleistungsgrenzen) zurückgreifen können, über die letztendlich die Auslegung der Netze erfolgt. Prinzipiell könnte auf eine Limitierung der Blindleistungsflüsse verzichtet werden, was allerdings sehr wahrscheinlich zu einem deutlich höheren Netzausbaubedarf führen würde. Alternativ könnte jeder Netzbetreiber seine Blindleistungsbilanz kompensieren, was zusätzliche Kosten für die Errichtung und den Betrieb von Kompensationsanlagen bedeutet. Im Sinne von § 1 Abs. 1 EnWG sind diese Aspekte bestmöglich abzuwägen und ein volkswirtschaftliches Optimum zu suchen. Da im Rahmen dieser Arbeit wirtschaftliche Aspekte unberücksichtigt bleiben, soll auch nicht der Versuch angestellt werden, sinnvolle Blindleistungsgrenzen zu definieren. Abzuschätzen ist allerdings, dass keine pauschale Lösung zielführend ist, sondern Netzbereiche individuell untersucht und bewertet werden sollten. Im Rahmen dieser Arbeit soll die aktuelle „technische“ Vorgehensweise, über die geeignete Maßnahmen zur Einhaltung definierter Blindleistungsgrenzen identifiziert, hinterfragt und optimiert werden.

2.3 Charakteristiken von Mittelspannungsnetzen

Im Fokus dieser Arbeit steht die Betrachtung einzelner Mittelspannungsnetze, die im Folgenden näher beschrieben werden.

2.3.1 Prinzipieller Aufbau von Mittelspannungsnetzen

Aus Sicht dieser Arbeit erstreckt sich ein MS-Netz vom HS/MS-Transformator hin bis zu den Endverbrauchern in der NS-Ebene. Typische Anschlussnehmer der

MS-Ebene sind folglich Niederspannungsnetze, MS-Betriebe mit eigener Kundenstation sowie EZA mit Anschlusspunkt in der MS- oder MS/NS-Ebene. MS-Netze werden typischerweise mit 20 kV (in städtischen Bereichen auch mit 10 kV) betrieben. Als Leitungen kommen sowohl Kabel als auch Freileitungen zum Einsatz, wobei der Trend stark zur Verkabelung geht. Im Austausch mit verschiedenen Netzbetreibern im Rahmen des Forschungsprojektes [2] konnte festgestellt werden, dass neben den oft genannten Strahlennetzen auch zunehmend Netze mit geschlossenen Ringen und Teilvermaschungen im Einsatz sind. Letztere besitzen durch ihre impedanzreduzierende Wirkung deutliche Vorteile bei der Spannungshaltung in Netzen hoher EZA- und/oder Last-Dichte. Nachteil dieser Netzformen ist die komplexere Schutzauslegung sowie die Bewertung der Spannungshaltung und der thermischen Belastung der Netzbetriebsmittel im Rahmen der Netzplanung aufgrund unvorhersehbarer Leistungsflüsse.

Bei der Bewertung des Blindleistungsverhaltens einzelner Netzakteure bzw. Netzbereiche ist die vorhandene Messtechnik zu berücksichtigen. Das hier diskutierte Verhalten bezieht sich auf die Verschiebungsblindleistung. Messgeräte für Abrechnungszwecke (registrierende Lastgangmessungen (RLM)-Zähler) in Deutschland bestimmen die Wirk- und Blindenergie anhand der Grundswingungskomponenten von Strom und Spannung. Die Rückrechnung auf die Blindleistung ergibt somit den Mittelwert der Verschiebungsblindleistung über den Aggregationszeitraum. Messpunkte des Netzleitsystems, die primär für den Netzschutz verwendet werden, arbeiten überwiegend mit Effektivwerten, weshalb die berechneten Leistungsgrößen nicht zwangsläufig die Grundswingungskomponenten von Wirk- und Blindleistung enthalten²². Bei mobilen Messgeräten gibt es unterschiedlichste Konstellationen, weshalb eine genaue Prüfung der internen Berechnungsvorschriften und Einstellungsoptionen vor Beginn der Messung sinnvoll ist.

In MS-Netzen besteht anders als in den überlagerten Netzebenen keine durchgehende Durchdringung von Messtechnik, was erklärt, weshalb heutige Regelkonzepte (z. B. [11, 12, 13]) für Blindleistungsquellen (vorwiegend EZA) nur Anlagen mit Anschluss am HS/MS-Transformator, in dessen unmittelbarer Nähe und in höheren Netzebenen berücksichtigen. Messpunkte des Netzleitsystems sind ty-

²²Der Einfluss bzw. die Höhe der neben der Verschiebungsblindleistung auftretenden Blindleistungsarten kann nicht pauschal beziffert werden. In Abschnitt 3.4.3 zeigt Abbildung 3.38 die Auswertung einer Messung an der Unterspannungsseite eines MS/NS-Transformators, bei dem die totale Blindleistung selbst bei hohen Auslastungen um ca. 30 % größer als die Verschiebungsblindleistung ist.

pischerweise die Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators (Summenmessung der Wirk- und Blindleistungsbilanz), Abgänge an Schaltanlagen sowie Anschlüsse großer EZA. Zur Umsetzung eines auf einem Regelungsprinzip basierenden Blindleistungsabrufs müssten i. d. R. folglich die Messtechnik und die Kommunikationstechnik²³ zur Anbindung der Blindleistungsquellen deutlich erweitert werden. Zielführender erscheint ein Ansatz, der ohne umfangreiche Nachrüstung der Messtechnik in der MS-Ebene und mit einem geringen Kommunikationsaufwand auskommt.

2.3.2 Zusammensetzung des Wirk-Blindleistungshaushalts von Mittelspannungsnetzen

Als Wirk-Blindleistungshaushalt oder -Bilanz eines MS-Netzes wird die Bilanz der im MS-Netz auftretenden Wirk- und Blindleistungsflüsse gemessen an der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators bezeichnet, d. h. die Summe des Wirk- und Blindleistungsverhaltens aller vorhandenen Verbraucher, EZA und Netzbetriebsmittel im MS-Netz. Als bekannt angenommen wird das Wirkleistungsverhalten der einzelnen Komponenten, weshalb auf dieses nicht mehr näher eingegangen wird.

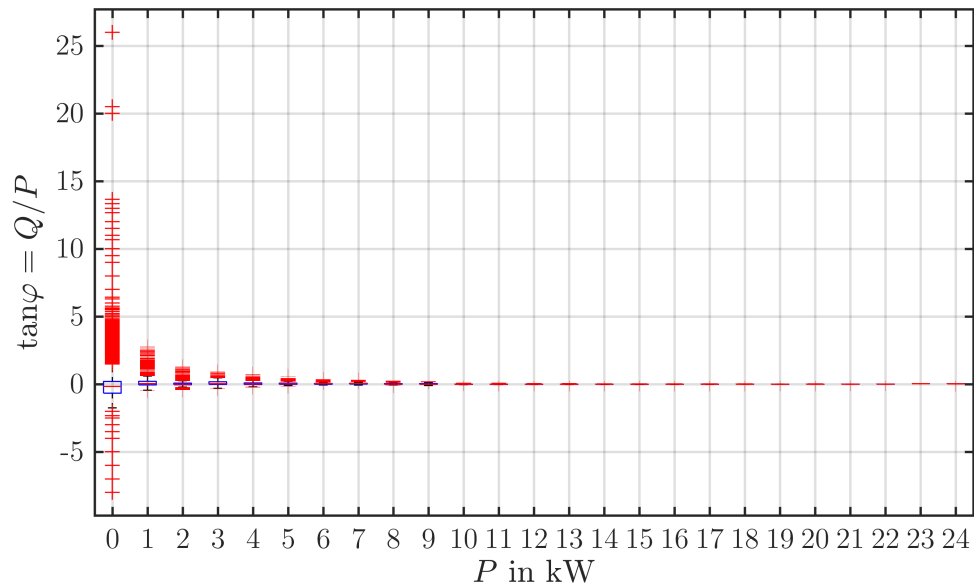
Blindleistungsverhalten von Verbrauchern

Auf Verbraucherseite ist ein über alle Gruppen prinzipiell gleiches Blindleistungsverhalten zu erkennen. Als Beispiel hierfür ist in Abbildung 2.3 ein P - $\tan\varphi$ -Diagramm aufgetragen, das exemplarisch das Verhalten von Haushalten zeigt. Mit zunehmender Wirkleistungsaufnahme sinkt der mittlere $\tan\varphi$ ²⁴ und dessen Streuung nimmt ab. Bei Haushalten, Gewerben und Landwirtschaften liegt dies primär an der Wirkleistungsdominanz der vor Ort installierten Endgeräte. Blindleistungskompensationsanlagen findet man erst bei größeren Gewerben und Industriebetrieben, d. h. bei Sondervertragskunden. Eine genauere Beschreibung der Blindleistungskompensation erfolgt in Abschnitt 2.5. Weiter ist

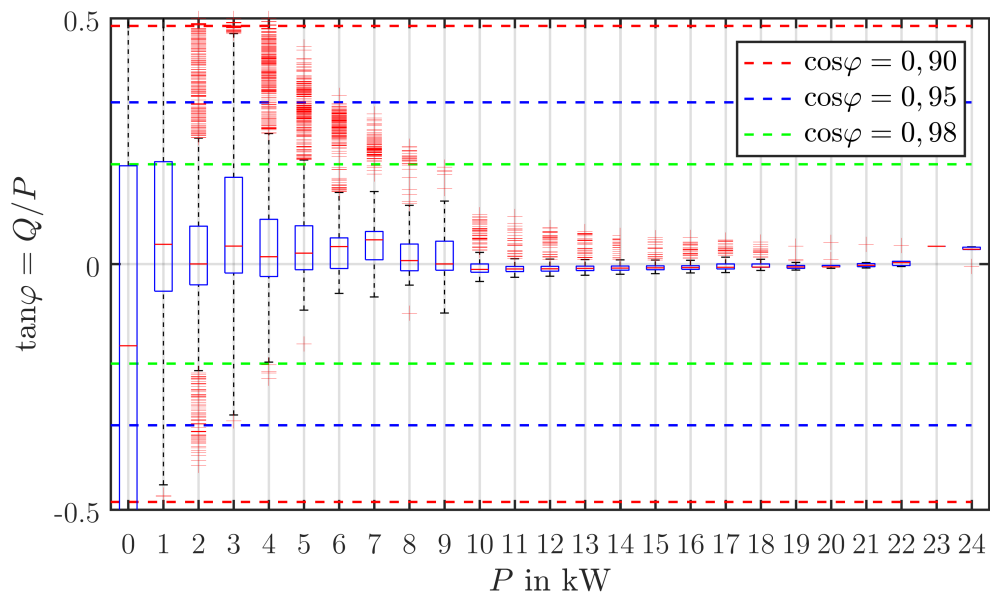
²³Einzelne Netzbetreiber binden bereits heute standardmäßig EZA mit Anschlusspunkt in der MS-Ebene an die Netzleitstelle an, wie Erfahrungen aus dem Forschungsprojekt [2] zeigen. Die Kosten wurden hierbei in Höhe von ca. 3 T€ pro Anschluss beziffert. Zu erwarten ist, dass sich dieser Trend fortsetzt und somit die Netzabsicherung als bleibende Herausforderung in der MS-Ebene bleibt.

²⁴Gewählt wird die Darstellung des Blindleistungsverhaltens durch Angabe des $\tan\varphi$, da dieser definitionsgemäß vorzeichenbehaftet die Blindleistungsart richtig wiedergibt ($\cos\varphi$ ist mathematisch nur positiv definiert) und zudem der Blindleistungsarbeitsbereich höher aufgelöst wird als bei Verwendung des $\cos\varphi$.

zu beobachten, dass bei niedrigen Wirkleistungswerten die Streuung der $\tan\varphi$ -Werte zunimmt und diese auch stark kapazitiv werden können. Dies wird durch die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Entstehungsmöglichkeiten für die Verschiebungsblindleistung begründet, da mit sinkender Wirkleistung der Einfluss von nichtlinearen Verbrauchern und unsymmetrischer Netzlast steigt. Hinzu kommt bei größeren Kundennetzen der Blindleistungsbedarf durch die Ladeleistung der Leitungen. Große Gewerbe- und Industriebetriebe wirken i. d. R. durchgehend induktiv, was zum einen an der Korrelation zwischen der Wirkleistungsaufnahme und dem induktiven Bedarf von Endgeräten (z. B. Antriebe, Pumpen, Lüfter) und zum anderen am induktiven Bedarf der kundeneigenen Transformatoren liegt.



(a) Gesamtdaten



(b) Zoom der Ordinate

Abbildung 2.3: Wirk-Blindleistungsverhalten von Haushaltsverbrauchern im P - $\tan \varphi$ -Diagramm als Boxplots. Datenbasis bilden die Messdaten von 50 Smart Metern in Form von 1-Minuten-Mittelwerten über einen Zeitraum von knapp einem Jahr aus dem Projekt [2].

Blindleistungsverhalten von Erzeugungsanlagen

EZA müssen differenziert betrachtet werden. Zum einen können sie Blindleistung aktiv zu Zwecken der Spannungsblindleistungsregelung oder zu Kompensationszwecken einsetzen und andererseits können sie bei „Stillstand“ der Anlage (z. B. nachts oder bei Windflauten) wie Verbraucher wirken. Der „passive“ Blindleistungsbedarf resultiert dabei aufgrund der internen Anlagenstruktur, z. B. der Parkverkabelung, die bei Windparks aus eigenen MS-Leitungen und mehreren Transformatoren bestehen kann. Beim aktiven Blindleistungseinsatz zur Spannungshaltung wird ausgenutzt, dass ein induktives Anlagenverhalten spannungssenkend und ein kapazitives spannungsanhebend wirkt. Zur Regelung der EZA werden Kennlinien oder Steuerbefehle aus der Netzleitstelle²⁵ verwendet. Die gängigsten Regelkennlinien verwenden die aktuelle Wirkleistungseinspeisung der EZA (z. B. $\cos\varphi(P)$ -Kennlinien) oder das Spannungsniveau am NVP (z. B. $Q(U)$ -Kennlinien). Zuletzt genannter Variante wird oftmals ein effizienterer Blindleistungseinsatz unterstellt, da nur ab tatsächlich relevanten Spannungsniveaus Blindleistung eingesetzt wird. Ein Nachteil ist, dass bei einheitlicher Kennlinienvorgabe Anlagen mit geringer Netzimpedanz keinen oder nur einen geringen Beitrag zur Spannungshaltung liefern, da die ermittelten Spannungshübe deutlich geringer ausfallen, als bei „tief“ im Netz angeschlossenen Anlagen. Die wirkleistungsabhängige Kennlinie wirkt dagegen präventiver, kann aber aufgrund von Überlagerungseffekten in weitläufigen Netzen mit vielen EZA von Vorteil sein. In MS-Netzen werden EZA primär zur Spannungsblindleistungsregelung eingesetzt, heute unüblich ist es hingegen den Blindleistungshaushalt zu kompensieren.

Blindleistungsverhalten von Transformatoren und Leitungen

Die Beschreibung des Blindleistungsverhaltens von Transformatoren und Leitungen wurde vom Autor dieser Arbeit bereits in der Studie [3] veröffentlicht und wird im Folgenden zitiert:

„Sowohl Transformatoren als auch Leitungen weisen eine belastungsabhängige Blindleistungscharakteristik auf. Leitungen können im Gegensatz zu Transformatoren auch kapazitiv wirken. Dies hängt maßgeblich vom Leitungstyp und der betrachteten Spannungsebene ab. Generell gilt für die Netzbetriebsmittel, dass

²⁵Fernwirkverbindungen werden i. d. R. nur bei Anlagen großer Leistung verwendet, da dies mit Aufwand für kommunikationstechnische Anbindungen und für die Integration ins Netzleitsystem verbunden ist. Üblich ist dies heute für EZA ab Anschlusspunkt in der HS/MS-Ebene.

ihr Blindleistungsbedarf überproportional von der Belastung abhängt und diese mit steigender Belastung immer induktiver wirken. Im Leerlauf oder Schwachlastfall weisen Leitungen kapazitives und die Transformatoren nur schwach induktives Verhalten auf. Im Starklastfall, d. h. bei hohem Bedarf der Abnehmer bzw. bei hoher Einspeisung wirken die Netzelemente zunehmend induktiv. In diesem Fall wird kapazitive Blindleistung benötigt, um den auftretenden Blindleistungsbedarf zu kompensieren. Hohe Belastungen und der Einsatz von Freileitungen führen hierbei zu induktivem Verhalten. Bei Schwachlast führt der starke Zubau von Kabeln und Freileitungen zu einem höheren kapazitiven Blindleistungsverhalten. Da Kabel kapazitiver wirken als Freileitungen, führt die Begünstigung von Kabeln zu einer Verstärkung dieses Effekts.“ [3]

Abbildung 2.4 und Abbildung 2.5 zeigen beispielhaft das Blindleistungsverhalten von Transformatoren und Leitungen in Abhängigkeit der Belastung (nähere Informationen zur mathematischen Berechnung enthält Anhang A.1).

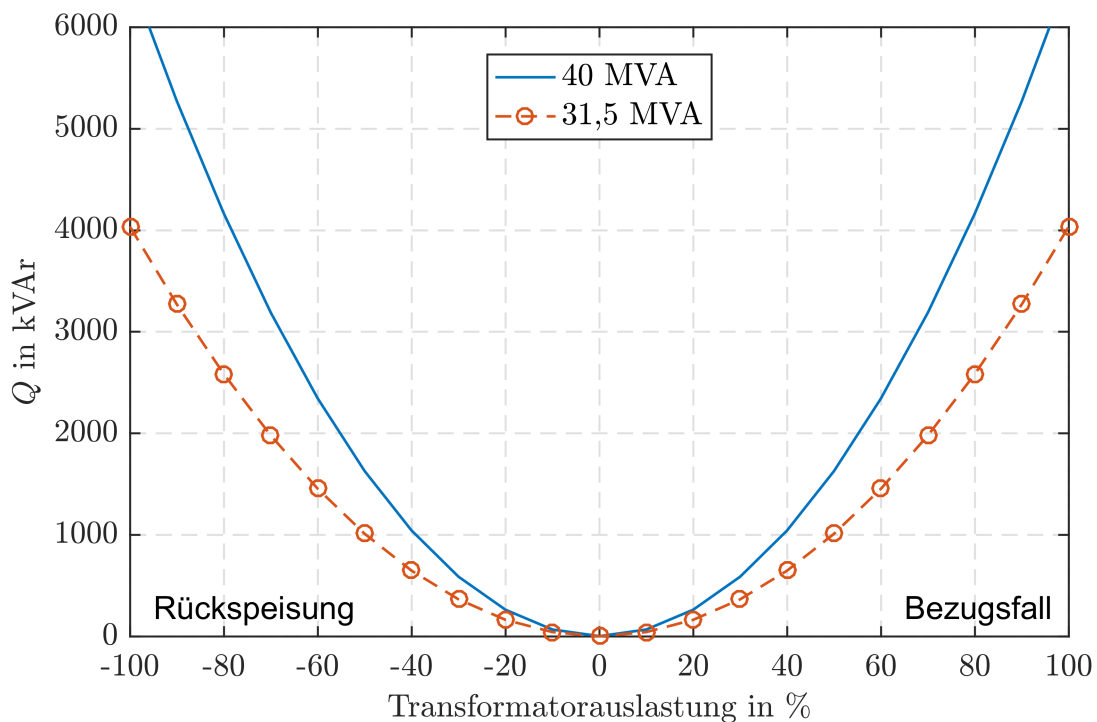


Abbildung 2.4: Blindleistungsverhalten von typischen HS/MS-Transformatoren unterschiedlicher Bemessungsleistung. Nach [3].

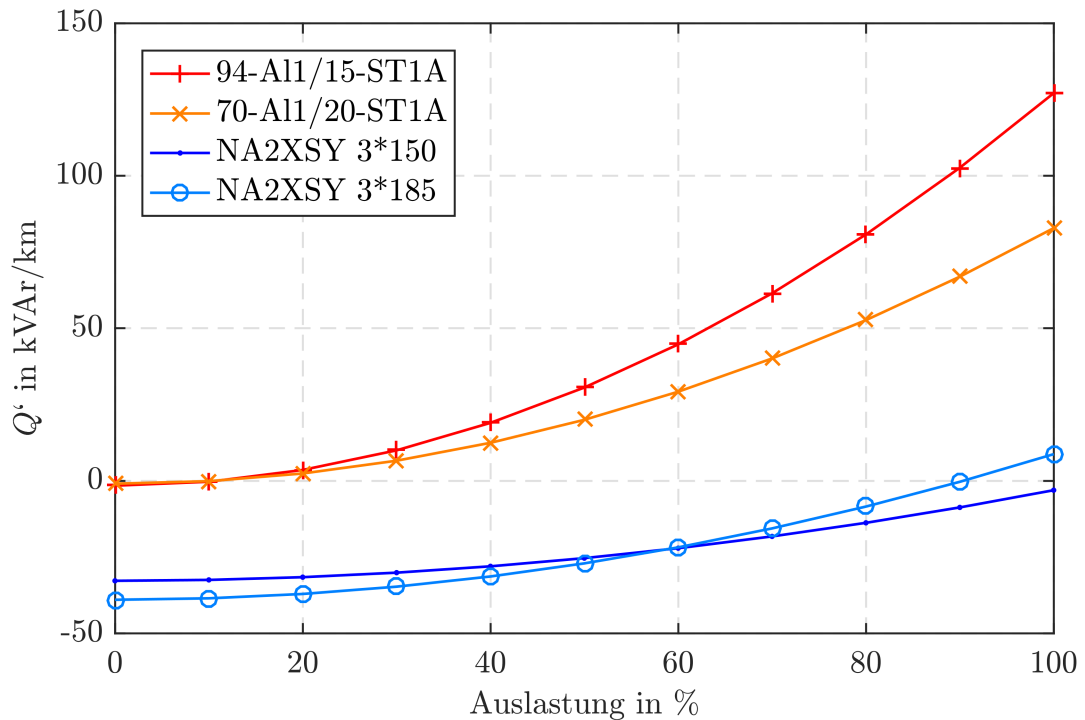


Abbildung 2.5: Blindleistungsverhalten von typischen MS-Leitungen; die beiden oberen Linien stehen für zwei unterschiedliche Freileitungstypen, die beiden unteren Linien für zwei verschiedene Kabelversionen. Nach [3].

Blindleistungsverhalten von Netzbereichen

Das Blindleistungsverhalten von einzelnen Netzbereichen (z. B. eines einzelnen NS- oder MS-Netzes) setzt sich aus dem von Verbrauchern, EZA und Netzbetriebsmitteln zusammen. Je nach Dominanz der Akteure kann ein einzelnes Verhalten durchgehend oder temporär in den Vordergrund treten oder ein Mischverhalten sichtbar werden. Im Folgenden werden verschiedene reale Beispielnetze diskutiert, zu denen Anhang A.2 weitere Eckdaten enthält.

Abbildung 2.6 zeigt ein MS-Netz mit einer installierten EZA-Leistung von ca. 56 MW. Durch die Dominanz der EZA kommt es zu erheblichen Wirkleistungsflüssen ins HS-Netz. Der induktive Anstieg im II. Quadranten ist dabei in diesem Netz nicht allein auf die Spannungsblindleistungsregelung der EZA zurückzuführen, sondern primär auf die hohe Auslastung der MS-Leitungen (Verkabelungsgrad liegt bei 19 %). Würde man den Blindleistungsbedarf des HS/MS-Transformators mit einbeziehen, so würde sich aufgrund der hohen Transformatorauslastung und dessen überproportionalen Blindleistungsverhaltens ein maximaler

Blindleistungswert von ca. 8 MVar bzw. $0,25 \frac{Q}{S_{r \text{ HS/MS-Transformator}}}$ ergeben, also eine Verdoppelung. Unterstellt man für dieses Netz typische Blindleistungsgrenzen (blaue $\cos\varphi$ -Grenzlinien) von $\cos\varphi$ gleich 0,95 im I. und II. Quadranten, $\cos\varphi$ gleich 0,925 im III. Quadranten und einem unzulässigen IV. Quadranten, so zeigt sich, dass im Bereich $\pm 10 \% \frac{P}{S_{r \text{ HS/MS-Transformator}}}$, d. h. um den Wirkleistungsnull-durchgang, Grenzwertverletzungen auftreten. Die grau gestrichelten Linien kennzeichnen Arbeitspunkte mit konstanter Auslastung des HS/MS-Transformators. Hierauf wird in Abschnitt 2.4.3 näher eingegangen.

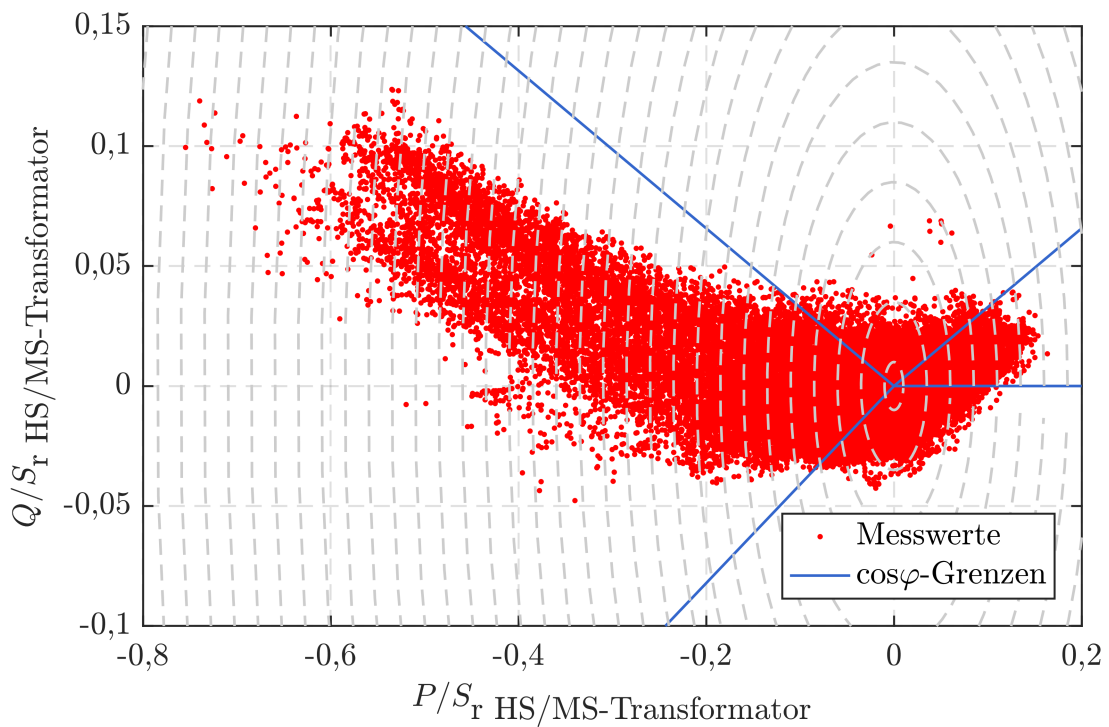


Abbildung 2.6: Wirk-Blindleistungsverhalten eines MS-Netzes (Beispielnetz Land_EZA) mit dominanter PV-Erzeugung. Wirk- und Blindleistung sind auf die Bemessungsleistung des HS/MS-Transformators $S_{r \text{ HS/MS-Transformator}}$ normiert, die 40 MVA beträgt. Datenbasis bilden Messwerte eines Netzbetreibers aus dem Projekt [2] in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres (2015).

Abbildung 2.7 zeigt das Wirk-Blindleistungsdiagramm eines MS-Netzes mit dominantem MS-Betrieb. Deutlich zeichnen sich zwei Blindleistungsniveaus ab. Aufgrund des Dreischichtbetriebs des Betriebs wird der obere Bereich ($\frac{Q}{S_{r \text{ HS/MS-Transformator}}}$ ca. 3 % bis ca. 7 %) an Werktagen und der untere ($\frac{Q}{S_{r \text{ HS/MS-Transformator}}}$ ca. -3 % bis ca. 1 %) an Sonn- und Feiertagen eingenommen. Weiter ist eine horizontale Ausdehnung zu beobachten. Diese resultiert aufgrund der installierten PV-Anlagen

und WEA. Die sehr geradlinige Ausprägung des maximalen induktiven Blindleistungsverhaltens ist auf die Wirk- und Blindleistungsdominanz des MS-Betriebs an Werktagen zurückzuführen. Die dabei auftretende induktive Blindleistung der Netzgruppe bleibt nahezu konstant, wohingegen der Wirkleistungsbezug, durch die im Netz installierten EZA reduziert bzw. überkompensiert wird.

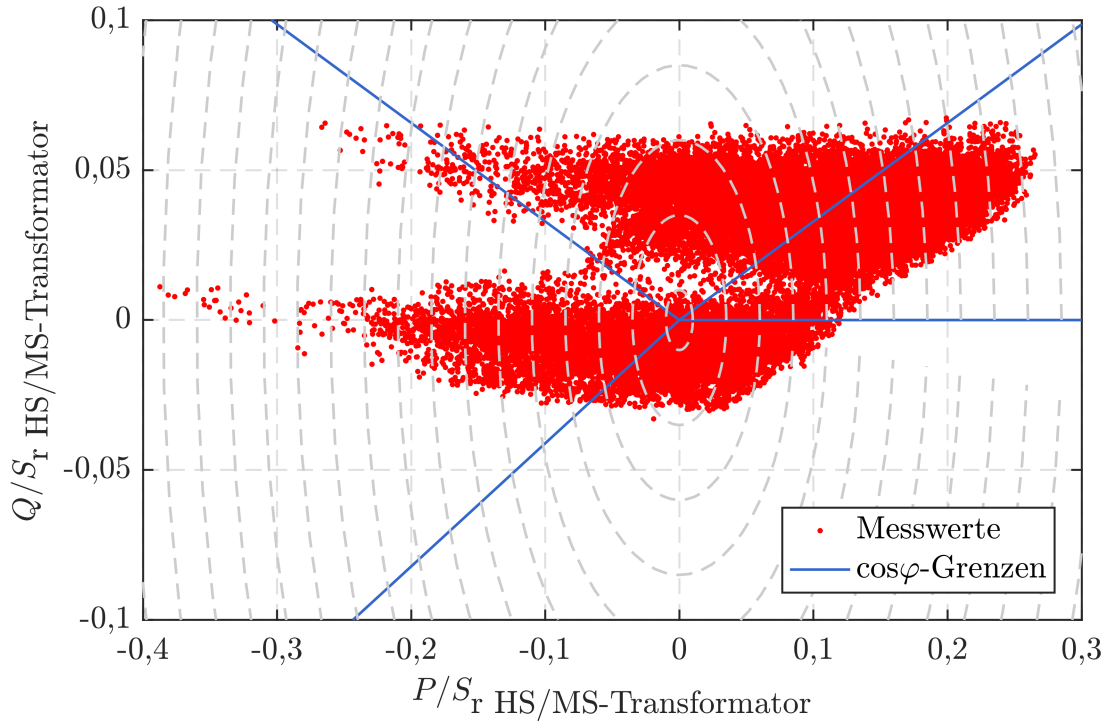


Abbildung 2.7: Wirk-Blindleistungsverhalten eines MS-Netzes (Beispielnetz Land_Betrieb) mit dominantem einzelnen MS-Betrieb und EZA-Einspeisung. Wirk- und Blindleistung sind auf die Bemessungsleistung des HS/MS-Transformators $S_{r \text{ HS/MS-Transformator}}$ normiert, die 40 MVA beträgt. Datenbasis bilden Messwerte eines Netzbetreibers aus dem Projekt [2] in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres (2015).

Das Wirk-Blindleistungsverhalten eines von Verbrauchern geprägten MS-Netzes zeigt Abbildung 2.8. Dieses Netz wird mit geschlossenen Ringen betrieben und die vorhandene installierte EZA-Leistung beträgt ca. 7 MW. Trotz der installierten EZA-Leistung zeichnet sich ein typisches Verbraucherverhalten ab, d. h. eine hohe Korrelation zwischen Wirk- und Blindleistung. Ca. 45 % aller Arbeitspunkte liegen im I. Quadranten. Die dortige Spitze von ca. 22 MVA bzw. ca. 55 % $\frac{S}{S_{r \text{ HS/MS-Transformator}}}$ wird um die Mittagszeit erreicht und wird durch die vorrangige Einspeisung von PV-Anlagen gedämpft. Nachts bei Schwachlast wird in den IV. Quadranten aufgrund der kapazitiven Ladeleistung der Netzgruppe (mit

Verkabelungsgrad von 100 %) gewechselt.

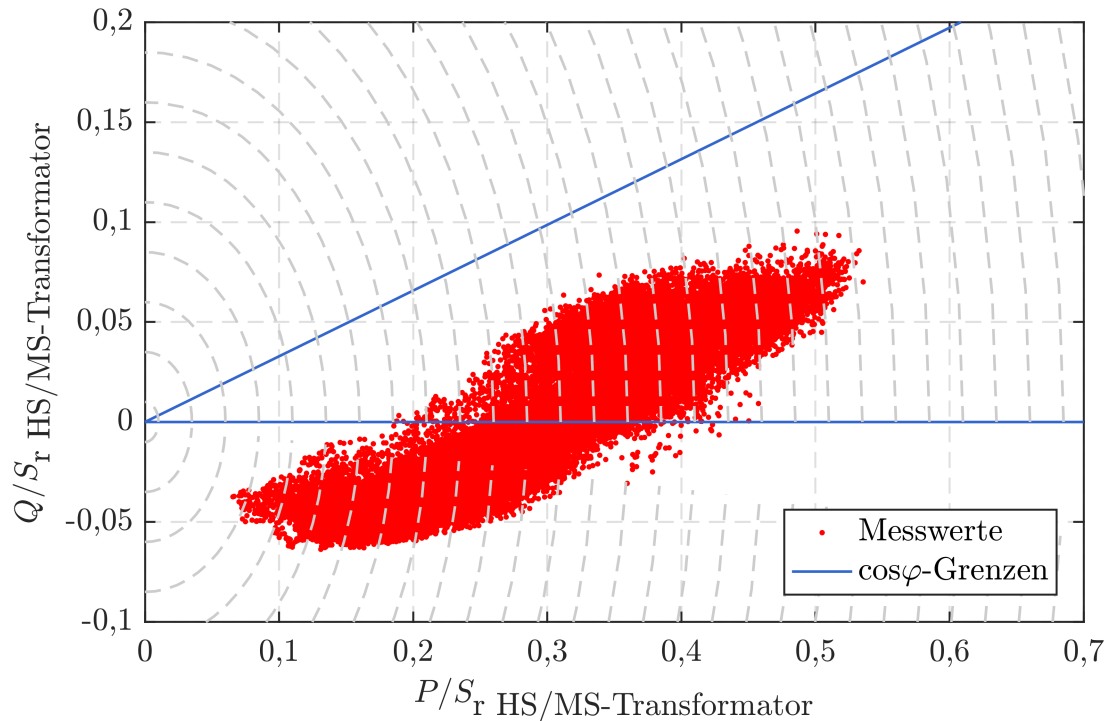


Abbildung 2.8: Wirk-Blindleistungsverhalten eines MS-Netzes (Beispielnetz Stadt_Industrie) mit dominanten MS-Betrieben. Wirk- und Blindleistung sind auf die Bemessungsleistung des HS/MS-Transformators S_r HS/MS-Transformator normiert, die 40 MVA beträgt. Datenbasis bilden Messwerte eines Netzbetreibers aus dem Projekt [2] in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres (2015).

Diese drei Beispiele zeigen, dass sich der Wirk-Blindleistungshaushalt von MS-Netzen²⁶ auf unterschiedliche Art und Weise zusammensetzen kann und deshalb bei der Definition von Lösungsmaßnahmen zur Behebung von Blindleistungsgrenzwertverletzungen keine pauschale Aussage möglich ist. Zielführender erscheint ein Verfahren, das basierend auf den Ursachen der Grenzwertverletzungen netzgruppenspezifisch Abhilfemaßnahmen definiert.

Ergänzende Beschreibungen zum Blindleistungsverhalten verschiedener Netzakteure können den Studien des ZVEI, des BMWi, der E-Control und der dena [3, 9, 38, 39] entnommen werden.

²⁶Bei größeren Netzbereichen z. B. ganzen HS-Netzen ist mit Ausgleichseffekten zu rechnen, jedoch sind analog unterschiedliche Ausprägungsformen des Wirk-Blindleistungsverhaltens zu erwarten.

2.3.3 Auflistung von Beeinflussungsmöglichkeiten des Blindleistungshaushalts eines Mittelspannungsnetzes

Prinzipielle Einflussfaktoren auf den Blindleistungshaushalt sind in [3, 5, 9] qualitativ beschrieben. An dieser Stelle soll eine kurze Übersicht über mögliche Maßnahmen gegeben werden, bei der diese in direkte und indirekte Maßnahmen unterteilt werden. Als direkte Maßnahmen werden solche bezeichnet, die der Netzbetreiber selbst veranlassen kann. Indirekte kann der Netzbetreiber nicht beeinflussen; er kann nur darauf reagieren.

Direkte Einflussmöglichkeiten sind:

- der Betrieb von netzbetreibereigenen Kompensationsanlagen (z. B. Drosselspule, Kondensator, Phasenschieber, Wechselrichter), über die aktiv Blindleistung bereitgestellt werden kann,
- die Nutzung und Parametrierung der Spannungsblindleistungsregelung durch EZA, über die primär induktive Blindleistung zur Spannungshaltung bei hoher Wirkleistungseinspeisung eingesetzt wird. Zukünftig kann hier auch auf Speicher und die Elektromobilität zugegriffen bzw. auf deren Nutzung zur Blindleistungsbereitstellung verzichtet werden,
- die Definition von Kompensationsvorgaben in TAB für Verbraucher, über die das maximal zulässige Blindleistungsverhalten von Verbrauchern beschränkt wird,
- die Netzbetriebsmittelwahl, da beispielsweise Freileitungen deutlich induktiver als Kabel wirken oder der induktive Blindleistungsbedarf von Transformatoren mit höherer relativer Kurzschlussspannung steigt,
- die Planung der Netzbetriebsmittelauslastung (z. B. über die Lage von Trennstellen oder die Wahl von Leiterquerschnitten und der Bemessungsleistungen von Transformatoren, die mit zunehmender Auslastung stets induktiver wirken),
- die Zusammenstellung von räumlichen Netzbereichen durch Umspannwerkstandorte und die Leitungsführung, da die Verbraucher-EZA-Kombination stark die Form des Wirk-Blindleistungsdigramms beeinflusst,
- die Spannungssollwertvorgabe am HS/MS-Transformator, da diese die Ladeleistung der Leitungen und das Wirk-Blindleistungsverhalten der Verbraucher beeinflusst und

- die Wahl des Spannungshaltungskonzeptes, da die Spannungshaltung stark von Blindleistungsflüssen beeinflusst wird und die derzeit verfügbaren Konzepte (z. B. regelbarer Ortsnetztransformator (RONT), Längsregler und Netzausbau) unterschiedliche Vor- und Nachteile in Bezug auf die zuvor aufgeführten Punkte mit sich bringen.

Indirekte Einflussfaktoren auf den Blindleistungshaushalt sind:

- die Betriebsweise von netzbetreiberfremden Blindleistungskompensationsanlagen, da diese zwar die TAB-Vorgaben erfüllen müssen, diese heute aber i. d. R. übererfüllt werden. So beträgt der Ziel- $\cos\varphi$ von Kompensationsanlagen typischer Weise 0,98, obwohl der TAB-Grenzwert bei 0,95 bzw. 0,90 liegt. Die Vorgabe eines Ziel- $\cos\varphi$ in TAB könnte hier klarere Verhältnisse schaffen, ist aber derzeit keine gängige Praxis,
- die Lastunsymmetrie in NS-Netzen, siehe Abschnitt 2.1 „Blindleistung“ und
- die Entwicklung der Lasten, bei der auf der einen Seite ein Rückgang des Blindleistungsbedarfs durch herkömmliche Drehstrommotoren aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Frequenzumrichtern zu verzeichnen ist, es aber auf der anderen Seite aufgrund der steigenden Anzahl von Geräten mit nichtlinearen Verhalten und der steigenden Automatisierung auch zu einer Zunahme der Verschiebungsblindleistung kommen kann.

2.4 Diskussion relevanter Aspekte der Netzplanung

Da die Verteilungsnetze und ihre Betreiber im Zuge der Energiewende vor großen und vor allem neuen Herausforderungen stehen, beschäftigen sich zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten mit verschiedensten Problemstellungen im Zusammenhang mit dem Betrieb und der Planung von Verteilungsnetzen. Im Fokus dieser Arbeiten stehen Themen wie z. B. die Auslegung neuer Betriebsmittel und Beschreibung ihrer Anwendung (z. B. RONT, siehe [40, 41, 42, 43]), die Entwicklung von Regelungs- und Steuerungskonzepten für EZA [44, 45, 46] und Lasten [47], die Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Wahl der geeigneten Spannungshaltungsmaßnahme (z. B. [48, 49]), die Beschreibung neuer Ansätze zur Systemdienstleistungserbringung (z. B. [13, 50]) sowie die Konzeptionierung automatisierter Planungstools, die vor allem die Kosten für den Leitungsausbau

durch Einsatz von Optimierungsalgorithmen minimieren sollen (z. B. [20, 47]). All diesen Ansätzen liegt zugrunde, dass sie nur einen Teilbereich des gesamten Netzplanungsprozesses²⁷ abdecken. Ziel ist es, die Netzrestriktionen Spannungshaltung und Betriebsmittelauslastung effizienter auszureizen bzw. zu erweitern. Der Einsatz von Blindleistung kann hierbei ein Mittel zum Zweck sein (wie z. B. bei der Spannungsblindleistungsregelung durch EZA). Bei der Planung von Verteilungsnetzen wird der Blindleistungshaushalt des Netzes, der ebenfalls Grenzen unterliegt, bislang kaum oder nicht beachtet.

Die Aktualität und Relevanz der Blindleistungsbilanz von Netzen wird deutlich, wenn man sich Beiträge wie [51] von Netzbetreibern vor Augen führt, in denen der Blindleistungshaushalt und dessen mögliche Beeinflussung über ein aktives Blindleistungsmanagement intensiv diskutiert und nach Lösungsmöglichkeiten gesucht wird. So beschreibt die Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH in diesem Beitrag ihre Methodik, bei der aktuell zur Spannungshaltung in NS- und MS-Netzen Blindleistungskennlinien genutzt werden, um EZA an der statischen Spannungshaltung zu beteiligen. Anlagen mit Anschlusspunkt am HS/MS-Transformator erhalten energieträgerunabhängig eine invertierte Kennlinie im Vergleich zu den Anlagen im MS-Netz, um einen Teil der anfallenden Blindleistung zu kompensieren. Für die Zukunft wird die netzzustandsabhängige Blindleistungsbereitstellung durch EZA im HS-Netz bei Beibehaltung von statischen Kennlinien in den unterlagerten Netzebenen angestrebt. Auf einen möglichen netzdienlichen Beitrag von Betrieben wird hingewiesen. Die pauschale Parametrierung der EZA mit Kennlinien, d. h. eine mögliche Blindleistungsvermeidung wird allerdings nicht hinterfragt.

Der Wunsch nach einem sorgfältigeren Umgang mit Blindleistung und deren Vorhaltung wird im Konferenzbeitrag [52] zum Ausdruck gebracht. Es wird erläutert, dass neben den primär betrachteten Kosten für die Vorhaltung der Blindleistung auch Verluste beim Abruf aus WEA bzw. Windparks entstehen. Hinsichtlich eines volkswirtschaftlichen Optimums sollte zudem die pauschale Vorhaltung der maximalen Blindleistungsfähigkeit an jeder Erzeugungsanlage überdacht werden, was bereits in [53] vom Verfasser dieser Arbeit gefordert wird.

Es lässt sich somit festhalten, dass die Verteilnetzplanung unter Berücksichtigung von Blindleistungsgrenzen des Blindleistungshaushalts ein für VNB aktuelles und

²⁷Der Netzplanungsprozess beinhaltet u. a. die Spannungshaltung, Betriebsmittelbelastung, Ausfallsicherheit ((n-1)-Auslegung bzw. Aspekte der Versorgungszuverlässigkeit), Schutzauslegungen, Netzwiederaufbaukonzepte, Wartungs- und Instandsetzungsplanungen und Strategieentwicklungen im Rahmen der Grundsatzplanung.

relevantes Aufgabenfeld mit entsprechendem Forschungsbedarf darstellt. In den folgenden Unterabschnitten wird weiter auf die primär zu berücksichtigten netzplanerischen Aspekte eingegangen, die im Zusammenhang mit dem hier entwickelten Verfahren von Bedeutung sind.

2.4.1 Beschreibung der simulationsgestützten Netzbewertung

Die simulationsgestützte Netzbewertung gehört zum heutigen Zeitpunkt zu den Standardwerkzeugen der Netzplanung. Da der Netzplanungsprozess verschiedenste Fragestellungen zu beantworten hat (siehe Anhang A.3), wird sie vielseitig eingesetzt (z. B. (n-1)-Ausfallanalysen oder Kurzschlussstromberechnungen). Die weitere Erläuterung beschränkt sich auf die Nutzung der stationären Lastflussberechnung zur Bewertung der statischen Spannungshaltung und der Betriebsmittelbelastung²⁸. Kern dieser Berechnung ist ein numerisches²⁹ Lösungsverfahren, über das die Ströme auf den Kanteelementen und die Spannungspotenziale der Knotenelemente des Netzmodells (siehe Begriffsdefinitionen) iterativ ermittelt werden. Formel 2.1 zeigt das zu lösende Gleichungssystem, über das die Spannungsänderung (Betrag $\frac{\Delta U_n}{U_r}$ und Winkel $\Delta \Theta_n$) von n Knotenelementen bezogen auf eine Wirk- bzw. Blindleistungsänderung (ΔP_n und ΔQ_n) berechnet werden kann. Genutzt werden hierbei die Spannungssensitivitäten, die die Elemente der inversen Jakobi-Matrix \mathbf{J}^{-1} repräsentieren.

$$-\mathbf{J}^{-1} * \begin{pmatrix} \Delta P_2 \\ \dots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \dots \\ \Delta Q_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta \Theta_2 \\ \dots \\ \Delta \Theta_n \\ \frac{\Delta U_2}{U_r} \\ \dots \\ \frac{\Delta U_n}{U_r} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

²⁸Die Randbedingungen der statischen Spannungshaltung und Betriebsmittelauslastung müssen primär erfüllt werden. Optimierungsstrategien (z. B. Verlustoptimierung oder Regelleistungsbereitstellung) können nur innerhalb dieser Grenzwerte stattfinden, was somit auch für das hier entwickelte Steuerungsverfahren für Blindleistungsquellen gilt.

²⁹D. h. die näherungsweise iterative Berechnung der mathematischen Lösung mit Vorgabe einer gewünschten Genauigkeit.

Bekanntestes Lösungsverfahren ist das Newton-Raphson-Verfahren, das in Anhang A.5 zusammen mit der genauen Herleitung des Gleichungssystems und der Bedeutung der einzelnen Vektoren und Matrizen näher erläutert wird. Grundlegende Eingangsdaten der stationären Lastflussberechnung sind die komplexen Werte der an den Netzknoten bezogenen Leistungen (Wirk- und Blindleistungsarbeitspunkte bzw. analoge Größen wie Stromwerte und Verschiebungsfaktor, die auch negative Werte annehmen können) und Impedanzen der Kantenelemente, sowie die komplexen Spannungspotenziale vorhandener Spannungsquellen. I. d. R. werden die Impedanzwerte nicht direkt, sondern über die Netzstruktur im Rahmen eines Netzmodells der Simulationssoftware übergeben. Dieses beinhaltet die Elementparameter von z. B. Leitungsabschnitten, die wiederum die Impedanzbeläge des jeweiligen Leitungstyps innehaben. Zusammen mit der Leitungslänge wird die jeweilige Impedanz des Kantenelements berechenbar. Da im Verteilungsnetz heute üblicherweise nur Teilnetze berechnet werden (z. B. einzelne HS- oder MS-Netze) gibt es Schnittstellen zu über- und unterlagerten Netzebenen. Bei Untersuchungen einzelner MS-Netze wird die NS-Ebene meist durch Ersatzlasten und EZA modelliert. Die vorgelagerte HS-Ebene wird als Slack-Knoten³⁰ ($n = 1$) mit festem Spannungsniveau und variabler Wirk- und Blindleistung implementiert. Eine Übersichtsgrafik zeigt Abbildung 2.9.

Mit den Ergebnissen der stationären Lastflussberechnung wird eine Netzbewertung vorgenommen, bei der die Einhaltung von Auslastungsgrenzwerten an Kantenelementen und von Spannungsbandgrenzen an Knotenelementen überprüft wird. Auf beide Bereiche wird in Abschnitt 2.4.2 und 2.4.3 näher eingegangen. Angestoßen wird eine Netzbewertung durch größere (un-)geplante Änderungen in der Netzstruktur - eine standardmäßige zyklische Bewertung findet heutzutage i. d. R. nicht statt. Das Ergebnis der Netzbewertung hängt stark von der Qualität der Nachbildung aller Netzmodellbestandteile ab, auf die in Abschnitt 2.4.5 näher eingegangen wird.

Da die simulationsgestützte Netzbewertung zum Standardwerkzeug der Netzplanung geworden ist, muss ein Verfahren zur Berücksichtigung von Blindleistungsquellen in ihr abbildbar sein. Um die Zusammensetzung des Blindleistungshaushalts und den Einsatz von Blindleistungsquellen zu bewerten, ist die Betrachtung von mindestens eines Zeitraums eines Jahres sinnvoll, da hier saisonale Effekte

³⁰Als Slack-Knoten wird ein Netzknoten bezeichnet, der dem Bilanzausgleich dient. An ihm werden z. B. die Wirk- und Blindleistungsbilanz bei fester Vorgabe der Spannung ausgeglichen.

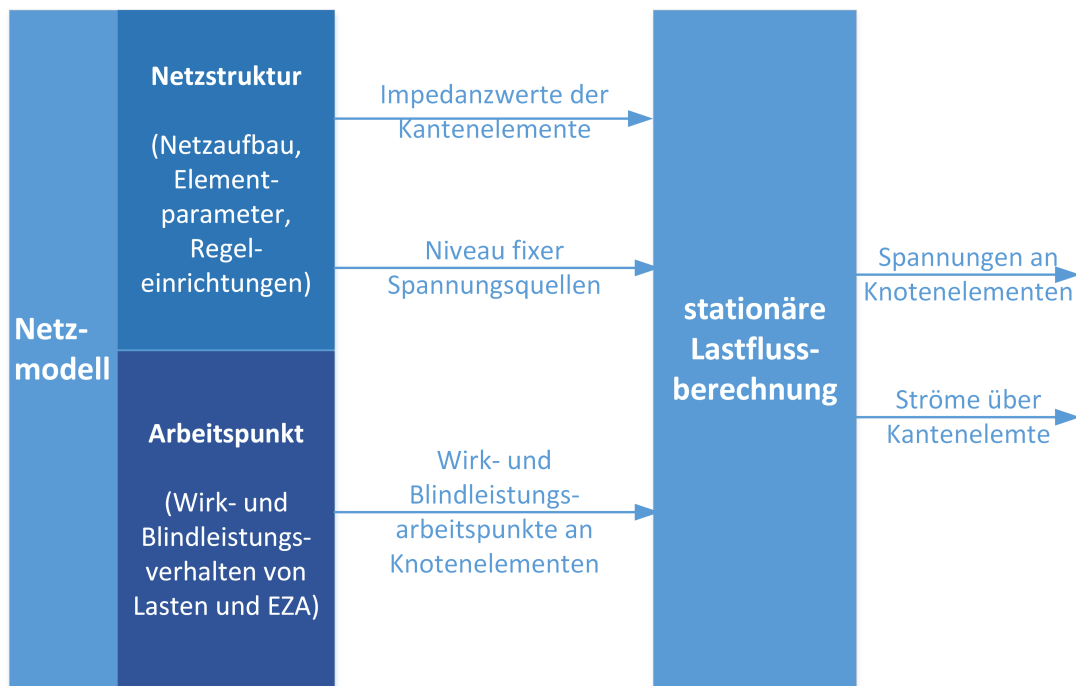


Abbildung 2.9: Darstellung der stationären Lastflussberechnung mit Ein- und Ausgangsdaten.

abgebildet sind. Da sich sowohl das Primärenergiedargebot, als auch das Verbraucherverhalten von Jahr zu Jahr ändern kann, ist eine zyklische Bewertung zur Nachführung der Steuerungsparameter ratsam, weshalb das Verfahren (teil-)automatisiert ausgestaltet werden sollte.

2.4.2 Randbedingungen der Spannungshaltung

Wie bereits angesprochen (siehe Abschnitt 2.4.1), erfolgt die Modellierung der Stromnetze abschnittsweise, wobei es gängige Praxis ist, sowohl horizontal als auch vertikal einzelne Netzbereiche abzugrenzen. In vertikaler Richtung erfolgt die Planung von Verteilungsnetzen üblicherweise separat für die Spannungsebenen HS, MS und NS³¹, weshalb definierte Planungswerte an den Schnittstellen eingehalten werden müssen (so auch Blindleistungsgrenzen). Dies gilt speziell für die hier betrachtete MS-Ebene, da diese zwar spannungsmäßig über den HS/MS-Transformator von der HS-Ebene entkoppelt ist³², aber aufgrund der

³¹Die HöS-Ebene wird vom Übertragungsnetzbetreiber geplant, der mit dem Verteilnetzbetreiber u. a. eine Sollspannung am HöS/HS-Transformator definiert.

³²Eine 100%ige Entkopplung ist nur gegeben, wenn der Transformator bzw. dessen Stufenschalter über einen Stellbereich verfügt, der die Schwankung der HS-Spannung ausregeln kann. Bei diskreten Regelkonzepten bleibt ein Einfluss in Höhe des Regelbandes erhalten.

überwiegend mit festem Übersetzungsverhältnis \ddot{u} ausgestatteten MS/NS-Transformatoren starr mit der NS-Ebene verbunden ist. Abbildung 2.10 zeigt ein entsprechendes Ersatzschaltbild.

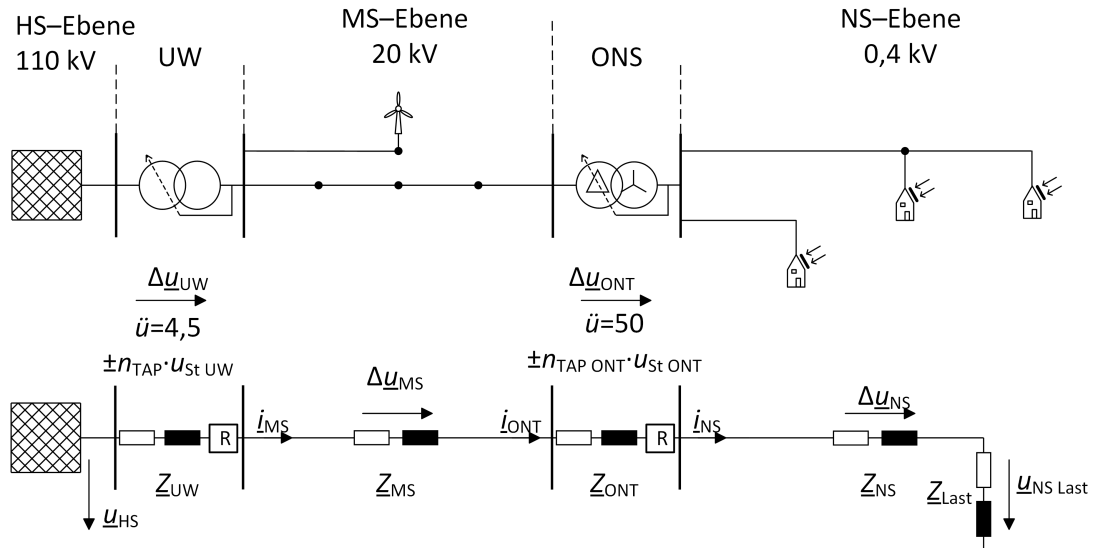


Abbildung 2.10: Darstellung des Ersatzschaltbildes für MS- und NS-Ebene inklusive HS/MS-Transformator. Nach [4].

Das einzuhaltende Spannungsband am NVP zu Kunden³³ ist in DIN EN 50160 [19] bzw. IEC 60038 [54] definiert. Für die MS-Ebene gilt, dass die Spannung $U_{NS \text{ Last}}$ innerhalb definierter Grenzen ($\pm 10 \%$) um die vereinbarte Versorgungsspannung U_C liegen muss (Bewertungsgrößen sind hierbei 10-Minuten-Mittelwerte). Zu berücksichtigen sind dabei die Bemessungsspannung U_b des jeweiligen Netzbetriebsmittels (z. B. 24 kV im 20-kV-Netz), weshalb gilt $U_c + 10 \% \leq U_b$, und das für die NS-Ebene reservierte Spannungsband für die Spannungsanhebung $\Delta U_{\text{Anhebung NS}}$ und den Spannungsfall $\Delta U_{\text{Fall NS}}$. Das zulässige Spannungsband bzw. Spannungsspreizung $\Delta U_{\text{zul MS}}$ der MS-Ebene wird somit über die Grenzwerte $U_{\text{max MS}}$ und $U_{\text{min MS}}$ nach Formel 2.2 und 2.3 aufgespannt. Über den Einsatz von RONT kann das zulässige Spannungsband im günstigsten Fall (flächendeckender Einsatz) jeweils komplett und unabhängig für die MS- und NS-Ebene verplant werden³⁴.

$$U_{\text{max MS}} = 1,10 \cdot U_c - \Delta U_{\text{Anhebung NS}} \leq U_b \quad (2.2)$$

³³Zu differenzieren ist hierbei nach „öffentlichen“ NS-Netzen und MS-Kundenstationen (z. B. MS-Betrieben oder MS-EZA), da bei ersten über das Übersetzungsverhältnis des MS/NS-Transformators noch Einfluss aus Sicht des Netzbetreibers genommen werden kann.

³⁴Eine beispielhafte Arbeit für den RONT-Einsatz in MS-Netzen ist die Dissertation [41].

$$U_{\min \text{ MS}} = 0,90 \cdot U_c + \Delta U_{\text{Fall NS}} \quad (2.3)$$

Innerhalb des zulässigen Spannungsbandes der MS-Ebene müssen die Extrema der Spannungsniveaus aller Netzknoten liegen und deshalb die auftretenden Spannungsanhebungen und Spannungsfälle begrenzt werden. Die in TAB angesprochenen Grenzwerte (z. B. Spannungsanhebung $\leq 2 \%$ in [18]) sind dabei als Richtwerte für die Spannungsbandaufteilung zu sehen³⁵. Davon abweichend kann der Netzbetreiber eine geeignete andere Aufteilung des Spannungsbandes für Spannungsanhebungen und Spannungsfälle vornehmen (z. B. einen größeren Bereich für den Spannungshub $\Delta U_{\text{Anhebung MS}}$ zulassen, wenn der erwartete Spannungsfall $\Delta U_{\text{Fall MS}}$ sehr gering ausfällt). Es gilt dabei folgende Bilanz zu berücksichtigen, die auch das Regelband der Stufenschalterregelung des HS/MS-Transformators $U_{\text{Regelband HS/MS-Transformator}}$ enthält:

$$U_{\text{zul MS}} = U_{\text{max MS}} - U_{\text{min MS}} = \Delta U_{\text{Anhebung MS}} + U_{\text{Fall MS}} + \Delta U_{\text{RB}} \quad (2.4)$$

Blindleistungsflüsse und Spannungshaltung stehen in engem Zusammenhang, was beispielsweise bei der Spannungsblindleistungsregelung durch EZA ausgenutzt wird. Im Umkehrschluss kann ein Einsatz von Blindleistungsquellen zum Blindleistungsbilanzausgleich einer Netzgruppe nicht unabhängig von der Spannungshaltung betrachtet werden. Die relevanten Zusammenhänge werden bei Betrachtung des komplexen Spannungsfalls $\Delta \underline{u}$ (Formel 2.5, die vereinfacht nur einen Impedanzabschnitt betrachtet, der kein spannungsregelndes Element enthält) und der Darstellung in der komplexen Ebene (Abbildung 2.11) ersichtlich. Großer Einfluss der Blindleistung auf die Spannung besteht, wenn der Effektivwert der Spannung (d. h. die Länge des komplexen Spannungszeigers) durch den Blindleistungsfluss stark verändert wird. Dies hängt nicht nur allein von der Höhe des Blindleistungsflusses ab, sondern auch vom Betrag und $\frac{R}{X}$ -Verhältnis der jeweiligen Impedanz.

$$\Delta \underline{u} = \underline{u}_{\text{LA}} - \underline{u}_{\text{LE}} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot U_n^2} \cdot [(P \cdot R - Q \cdot X) + j(P \cdot X + Q \cdot R)] \quad (2.5)$$

In Abbildung 2.11 sind die komplexen Spannungsfälle ($\Delta \underline{u}_{\text{ONT}}$) über den einzelnen Impedanzabschnitten der MS- und NS-Ebene qualitativ richtig eingezeichnet. Die

³⁵Für die Bestimmung des NVP sind diese allerdings bindend.

Impedanz von Transformatoren wird von dessen Streureaktanz dominiert, weshalb deren Spannungsfälle nahezu senkrecht auf der an der Oberspannungsseite anliegenden Spannung stehen. Bei Leitungen existiert eine merkliche Resistanz, was durch die „gedrehtere“ Lage der Spannungsfälle (Δu_{MS} und Δu_{NS}) angedeutet wird. Die Spannungsgrenzen von $\pm 10\%$ werden als Extrema in der NS-Ebene erreicht ($u_{\max NS}$ und $u_{\min NS}$). Zusätzliche Blindleistungsflüsse führen zu einer stärkeren Drehung der Spannungsfälle. Induktive Blindleistung wirkt dabei spannungssenkend, da die Spannungszeiger gestaucht werden. Kapazitive Blindleistung wirkt spannungsanhebend, da die Spannzeiger gestreckt werden. Auf eine ausführliche Herleitung der Grundlagen wird an dieser Stelle verzichtet und stattdessen auf die Informationsplattformen [4] und [55] verwiesen, an denen der Autor dieser Arbeit mitgewirkt hat.

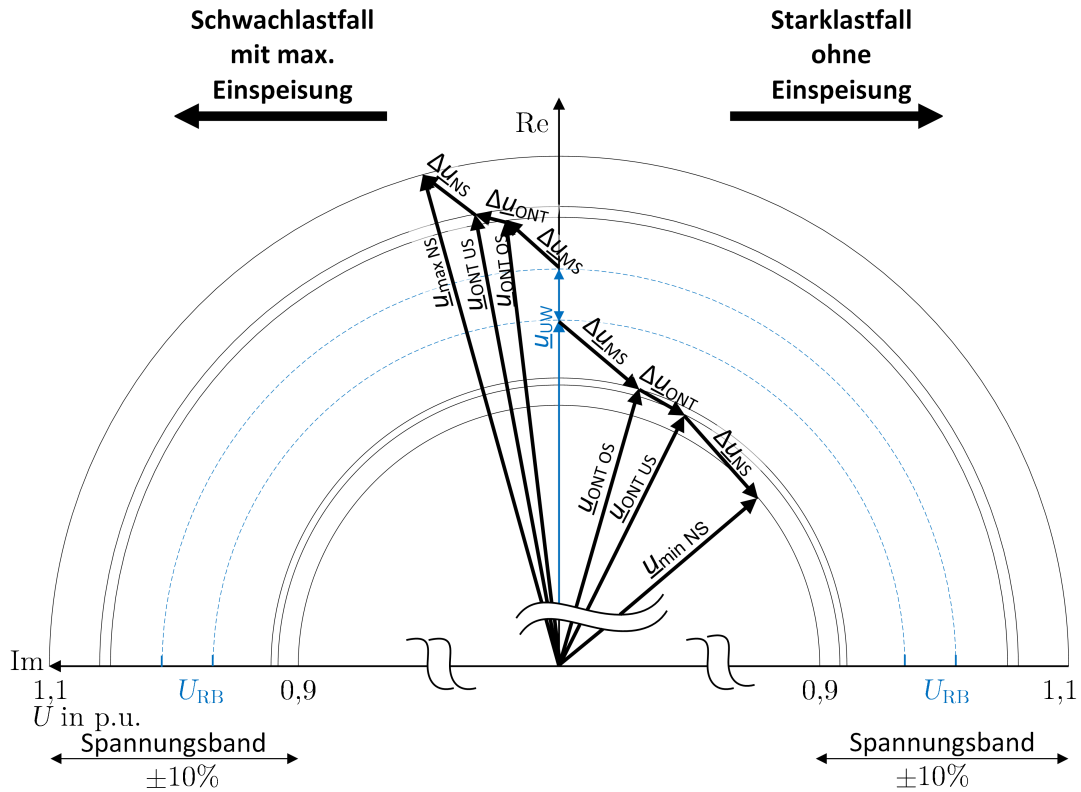


Abbildung 2.11: Darstellung des komplexen Spannungsfalles für die Last- und Einspeisesituationen in der MS-, MS/NS- und NS-Ebene. Grafik nach [4].

2.4.3 Analyse der Randbedingungen der Betriebsmittelbelastung

Die Betriebsmittelbelastung³⁶ steht in Zusammenhang mit verschiedenen Aspekten der Netzplanung. Primär sind Betriebsgrenzen einzuhalten, um die Betriebssicherheit eines Netzbetriebsmittels zu gewährleisten. Typische Beispiele sind:

- Begrenzung der thermischen Ausdehnung von Freileitungsseilen, um so den maximalen Durchhang zu limitieren, damit die Einhaltung von Feldstärkegrenzwerten sichergestellt ist.
- Vermeidung zu hoher Temperaturen in Transformatoren, durch die es zur Gasbildung im Isolieröl kommt, die die Durchschlagsfestigkeit reduzieren.
- Begrenzung der Kabeltemperatur, um ein Fließen der Isolierung (Verformung oder Austreten von Isolierflüssigkeit) zu vermeiden, wodurch es zu hohen Feldstärken und infolge dessen zu Durchschlägen kommen kann.

Weitere Aspekte sind die Alterung des Betriebsmittels (bei Kabeln und Transformatoren vorrangig die Alterung der Isolierung) sowie die belastungsabhängigen Verluste.

Im Folgenden werden zunächst allgemeine Aspekte zur Betriebsmittelauslastung diskutiert und anschließend eine Untersuchung zur Alterung und zum Temperaturverhalten von HS/MS-Transformatoren vorgestellt. Hierbei wird Bezug auf die Beispielnetze Stadt_Zentrum und Land_EZA genommen, die in Anhang A.2 näher beschrieben sind. Die beiden Netze wurden ausgewählt, da sie einerseits ein stark EZA-geprägtes Verhalten und andererseits ein industriegeprägtes Verhalten zeigen.

Allgemeine Aspekte zur Betriebsmittelauslastung

Abbildung 2.6 und Abbildung A.1 im Anhang A.2 zeigen die Wirk-Blindleistungsbilanz der beiden Beispielnetze. Als gestrichelte Linien sind „Äquischeinleistungslinien“ eingezeichnet, die sich als Kreise um den Ursprung ergeben und jeweils ein konstantes Auslastungsniveau symbolisieren. Zu erkennen ist, dass diese nahezu senkrecht die Wirk-Blindleistungswolke der Netzgruppe schneiden³⁷, was am

³⁶Im Rahmen dieser Arbeit wird sich auf HS/MS-Transformatoren und MS-Leitungen beschränkt.

³⁷Bereits optisch kann nachvollzogen werden, dass ein Blindleistungsabruf, der gleichzusetzen ist mit einer vertikalen Verschiebung eines Arbeitspunktes, nur eine geringe Scheinleistungsänderung bei hohen Wirkleistungen und damit auslegungsrelevanten Arbeitspunkten erzeugt.

niedrigen $\frac{Q}{P}$ -Verhältnis liegt, dass heute typisch für die Wirk-Blindleistungsbilanz von MS-Netzen ist. Dies liegt an den TAB-Grenzwerten, die i. d. R. einen Wert von $\cos\varphi$ gleich 0,90 für Verbraucher aufweisen (siehe Abschnitt 2.2.3) und dadurch die Entstehung von Blindleistung auf Endkundenseite im Lastfall begrenzen. Bei Starkeinspeisung wird primär Wirkleistung von den EZA erzeugt und Blindleistung wird nur zu Zwecken der Spannungshaltung in geringem Umfang eingesetzt (meist maximal bis zu einem $\cos\varphi$ gleich 0,90). Die Wirkleistung dominiert folglich das Verhalten von Netzgruppen an den Rändern der Wirk-Blindleistungsbilanz, an denen sich die auslegungsrelevanten Auslastungen für die Netzbetriebsmittel einstellen. Die Untersuchung des $\tan\varphi$ -Verhaltens im Anhang A.4 für verschiedene Auslastungsbereiche des HS/MS-Transformators und ausgewählten MS-Leitungen zeigt, dass mit zunehmender Scheinleistung der $\tan\varphi$ gegen einen Wert von ca. $\pm 0,2$ (Median) strebt. Dies gilt sowohl für die komplette Netzgruppenbilanz (gemessen an der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators), als auch für einzelne Leitungsabschnitte.

Ein heute anzunehmender geringer Einfluss von Blindleistungsabrufen auf die Auslastung begründet sich über die mathematischen Definition der Scheinleistung, die die geometrische Summe von Wirk- und Blindleistung ist ($S = \sqrt{P^2 + Q^2}$). Die Wirkleistung ist i. d. R. die dominierende Größe. In der Beispielnetzgruppe Land_EZA beträgt das $\frac{Q}{P}$ -Verhältnis im Starklastfall (I. Quadrant) ca. 0,40 und bei Starkrückspeisung (II. Quadrant) ca. 0,14. Änderungen im Blindleistungsbedarf wären somit in lastdominierten Netzgruppen im Hinblick auf die Auslastungsreduktion wirksamer als in einspeisegeprägten. Dies hängt damit zusammen, dass leistungsmäßig große Verbraucher (z. B. MS-Betriebe) einen korrelierenden Blindleistungsbedarf besitzen (siehe auch Abschnitt 2.3.2). Prinzipiell können die für HS/MS-Transformatoren gemachten Aussagen zur Auslastungsänderung auch auf MS-Leitungen übertragen werden, da dort ähnliche $\frac{Q}{P}$ -Verhältnisse vorliegen (siehe Anhang A.4).

Abbildung 2.12 zeigt Kennlinien zu verschiedenen Höhen der Blindleistungsänderung³⁸ ΔQ in Abhängigkeit des $\frac{Q}{P}$ -Verhältnisses vor einem Blindleistungsabruf. Die Ordinate wird auf die Scheinleistungsänderung ΔS bezogen auf die anfängliche Scheinleistung S_{Start} (d. h. vor dem Blindleistungsabruf) dargestellt. Bei negativen Blindleistungsabrufen kommt es zu Kompensationseffekten, weshalb die Scheinleistung sinkt und die Scheinleistungsänderung negativ ist. Mit stei-

³⁸Positive Werte in Abbildung 2.12 stellen eine Verstärkung dar, negative eine Abschwächung des anfänglichen Blindleistungsflusses.

gendem $\frac{Q}{P}$ -Verhältnis nimmt die Höhe der Scheinleistungsänderung zu, da die Scheinleistung zunehmend über die Blindleistung bestimmt ist. Die bereits angesprochenen Auswertungen zum $\tan\varphi$ -Verhalten im Anhang A.2 zeigen, dass bei hohen Auslastungen die $\frac{Q}{P}$ -Werte i. d. R. selbst in Extremfällen einen Wert von ca. 0,50 nicht überschreiten, was ca. einem $\cos\varphi = 0,90$ entspricht (bei mittleren hin zu hohen Auslastungswerten strebt der $\tan\varphi$ im Mittel gegen einen Wert von 0,2). Bei Verdopplung der aktuellen Blindleistung ($\Delta Q = +100\%$) ist somit mit einer maximalen Scheinleistungsänderung in Höhe von ca. 26 % der anfänglichen Auslastung zu rechnen. Bei Anwendung eines aktiven Blindleistungsmanagements muss zukünftig ggf. auch mit höheren $\tan\varphi$ -Werten gerechnet werden, da sich das Ausgangs- $\frac{Q}{P}$ -Verhältnis ändern kann. Eine andere Darstellungsform kann Abbildung 3.4 im Abschnitt 3.2.1 entnommen werden, bei der der Wert der Scheinleistungsänderung normiert auf den Blindleistungsabruf dargestellt wird. Bei einem Blindleistungsabruf, der zu einer Verdopplung des Anfangs-Blindleistungswertes führt, beträgt die Scheinleistungsänderung bis zu einem $\frac{Q}{P}$ -Verhältnis von 0,50 maximal ca. 60 % des Blindleistungsabrufs (z. B. 0,60 MVA bei 1 MVar Abruf).

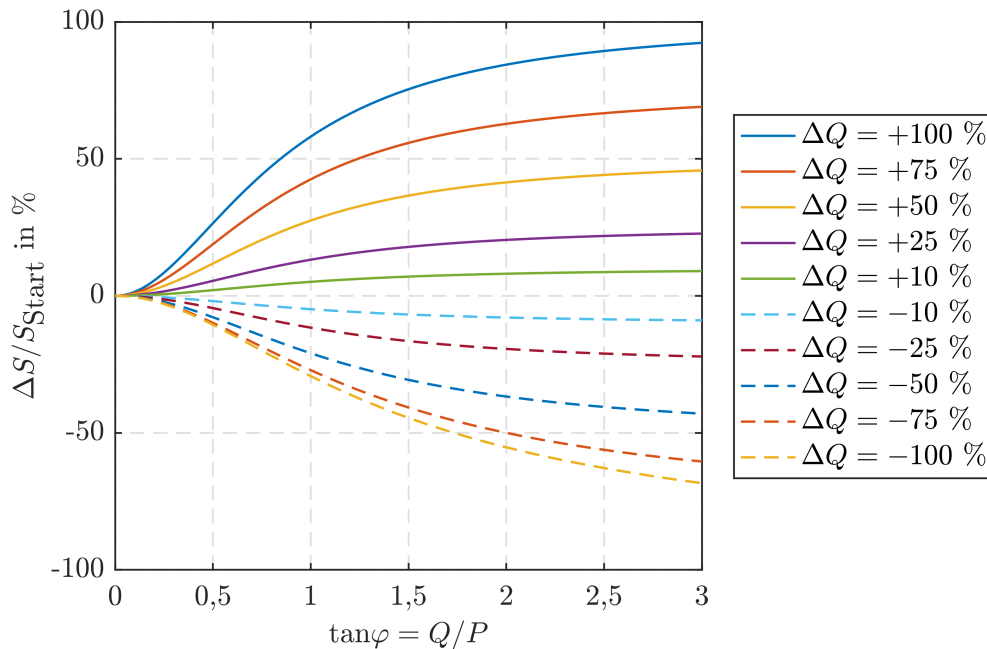


Abbildung 2.12: Darstellung der Scheinleistungsänderung ΔS bezogen auf die Ausgangs-Scheinleistung S_{Start} bei verschiedenen Blindleistungsänderungen ΔQ in Abhängigkeit verschiedener Ausgangs- $\frac{Q}{P}$ -Verhältnisse. Positive Werte sind als Verstärkung, d. h. Zunahme der Scheinleistung, zu verstehen.

Exemplarische Analyse des Alterungs- und Temperaturverhaltens von HS/MS-Transformatoren

Die Belastbarkeit von Transformatoren hängt laut Norm DIN IEC 60076-7 [56] maßgeblich von der Umgebungstemperatur und dem Belastungsprofil ab. Im Fokus steht dabei ein fester Grenzwert von 140 °C für die einzuhaltende Heißpunkttemperatur der Wicklung, da bei einer Überschreitung irreversible Zersetzungs- und Durchschlagsmechanismen ablaufen. Zu berücksichtigen sind aber auch die Alterungsprozesse der Wicklungsisolierung bei Heißpunkttemperaturen unter 140 °C. Das Belastungsprofil ist dabei über die Belastung des Transformators, d. h. den Scheinstrom, beschrieben. Dieser setzt sich aus einer Wirk- und einer Blindkomponente zusammen, weshalb eine Kompensation des Blindleistungsflusses über den Transformator entlastend wirkt und somit zu einer geringeren Alterung führt. Eine gezielte Blindleistungsbereitstellung für das überlagerte Netz kann bei Erhöhung der Blindkomponente die Alterung beschleunigen. Der Zusammenhang zwischen Belastung und Alterung ist dabei nicht linear, sodass bei Überschreitung einer Heißpunkttemperatur von über 80 °C eine Verdopplung des Lebensdauerverbrauchs pro 6 K eintritt. Auch bei Betrachtung der Leistungsflüsse unter Vernachlässigung der Alterungseffekte ergeben sich relevante Zusammenhänge in Bezug auf den Blindleistungsfluss. So bestimmt die Belastung des Transformators (Scheinleistung) darüber, ob Kundenanlagen (Betriebe oder Erzeugungsanlagen) aus thermischer Sicht am Umspannwerk angeschlossen werden können. Blindleistungsflüsse können somit theoretisch kostenintensive Wirkleistungsübertragungskapazitäten belegen.

Basierend auf einem in [56] beschriebenen Berechnungsmodell und realen Messdaten zur Transformatorbelastung sowie Umgebungstemperatur werden die maximale Transformatorauslastung, die Heißpunkttemperatur der Wicklung und die Lebensdauer der beiden Beispielnetze in Abbildung 2.13 dargestellt (von unten nach oben). In dieser Untersuchung wird das reale Belastungsprofil skaliert und als Kenngröße die mittlere jährliche Belastung verwendet, über der die Ergebnisparameter aufgetragen sind. Die blauen Kennlinien beschreiben das EZA-geprägte Beispielnetz Land_EZA, das keinerlei große einzelne Lasten besitzt. Die roten Kennlinien beschreiben hingegen ein von Industriebetrieben dominiertes Netz Stadt_Industrie ohne signifikante Einspeiser. Das $\frac{Q}{P}$ -Verhältnis bei Starklast liegt in diesem bei ca. 0,23, die maximale Auslastung bei ca. 61 %. Die realen Arbeitspunkte der beiden Netzgruppen sind durch gestrichelte Linien und Punkte markiert. Anhand der eingezeichneten realen Arbeitspunkte ist der Ein-

fluss der „Skalierung“ des Belastungsprofils gut nachzuvollziehen. Das EZA-geprägte Netz liegt mit der maximalen Auslastung und der auftretenden maximalen Heißpunkttemperatur über den Verläufen des lastdominierten Netzes. Die auf eine Nutzungsdauer von 20 Jahren bezogene Lebensdauer des Transformators sinkt aufgrund des schnellen Anstiegs der Heißpunkttemperatur deutlich schneller als die eines Transformators in einem industriegeprägten Netz. Dies zeigt, dass die mittlere Auslastung alleine keine Aussage über Alterung des Transformators zulässt, sondern auch eine Typisierung des Belastungsprofils notwendig ist. Zudem ist die Alterung der Transformatoren kein entscheidender Faktor an sich, da diese bei „normalen“ Spitzenbelastungswerten moderate Werte annimmt und zu sehr hohen Lebensdauern führt. Vielmehr ist die Entwicklung der Heißpunkttemperatur zu überwachen, da ab Erreichen einer Grenztemperatur von 140 °C die Gasbildung im Öl einsetzt und damit andere Alterungs- und Durchschlagsprozesse auftreten, die das Normmodell nicht abbildet. Diese Grenztemperatur wird im EZA-geprägten Netz bei ca. 150 % Spitzenlast und einer mittleren Auslastung von ca. 30 % erreicht (mit blauem Kreis markiert). Beim Industrienetz müsste eine Spitzenlast von ca. 180 % und eine mittlere Auslastung von ca. 102 % auftreten.

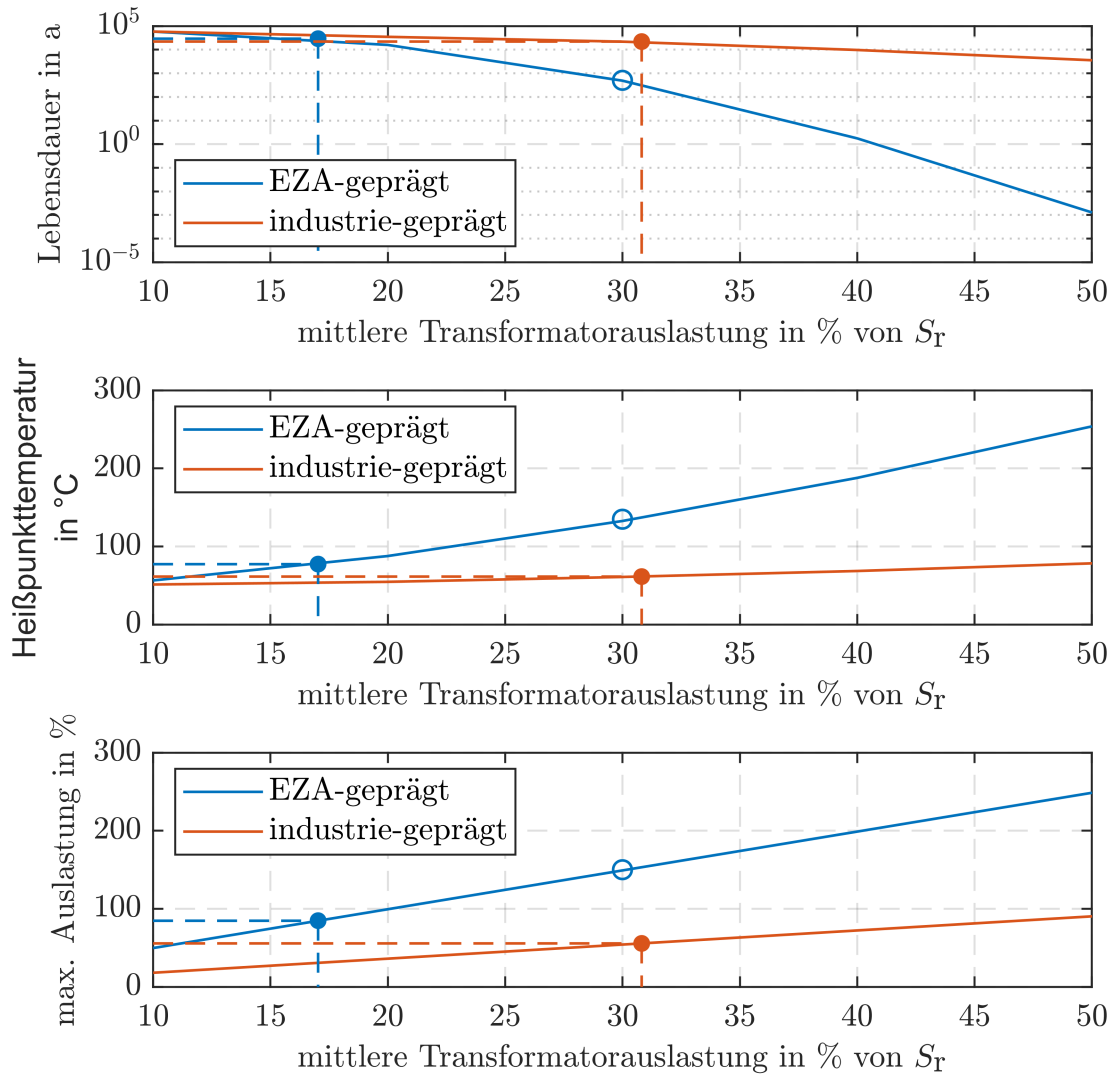


Abbildung 2.13: Belastungsuntersuchung von Umspannwerktransformatoren (maximale Transformatorauslastung, Heißpunkttemperatur und Lebensdauerverbrauch pro Jahr von unten nach oben), mit Kennzeichnung der realen Arbeitspunkte (gestrichelte Linien mit Punkten) und Arbeitspunkt der annähernd maximal zulässigen Heißpunkttemperatur von 140 % (blaue Kreise, bei industrie-geprägten Netz nicht dargestellt).

Zwischenfazit

An dieser Stelle kann festgehalten werden, dass bezugnehmend auf heute vorfindbare $\frac{Q}{P}$ -Verhältnisse und den dadurch resultierenden Verläufen der Äquiseinleistungslinien, keine signifikante Änderungen der auslegungsrelevanten Auslastung von HS/MS-Transformatoren und somit keine negativen Effekte im Hinblick auf deren Heißpunkttemperatur und Alterung bei einem Abruf von Blindleistung zu erwarten sind³⁹. Analoges kann MS-Leitungen konstatiert werden.

2.4.4 Bewertung von Verstärkungs- und Abschwächungseffekten eines Blindleistungsabrufs

Die Änderung von Blindleistungsflüssen führt zwangsläufig zu geänderten Spannungs- und Auslastungsverhältnissen im Stromnetz. Dies hat zur Folge, dass Verstärkungs- oder Abschwächungseffekte auftreten können. Beispielsweise besitzen Leitungen eine spannungsabhängige kapazitive und belastungsabhängige induktive Verlustleistung. Darüber hinaus ist auch die Spannungsabhängigkeit von Lasten zu berücksichtigen. Im Folgenden werden mögliche Einflüsse der Netzbetriebsmittel diskutiert. Dabei wird zuerst eine Detailbetrachtung des in Anhang A.2 beschriebenen MS-Netzes Stadt_Zentrum durchgeführt und dann eine Betrachtung über alle Spannungsebenen hinweg anhand eines vereinfachten Netzmodells angestellt. Eine Spannungsabhängigkeit der Lasten wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Detailbetrachtung eines einzelnen MS-Netzes

Bei einer durchgeführten Detailbetrachtung wird der Blindleistungsabruf an der Schwerpunktstation⁴⁰ des Beispielnetzes Stadt_Zentrum⁴¹ von 500 kVAr, 1.000 kVAr und 2.000 kVAr kapazitiv bzw. induktiv betrachtet und dabei die Änderung der Blindleistungsbilanz an der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators für jede $\frac{1}{4}$ -h des Jahres mittels Netzsimulationen ausgewertet. Abbildung 2.14 zeigt die Ergebnisse, die eine vernachlässigbar hohe Abhängigkeit des

³⁹MS/NS-Transformatoren können deutlich höheren Belastungen als HS/MS-Transformatoren ausgesetzt sein, da diese nicht (n-1)-sicher ausgelegt werden. Zudem ist die Einhausung zu beachten, weshalb sich andere Verhältnisse ergeben können. Da der Blindleistungsabruf aus Blindleistungsquellen der MS-Ebene fokussiert wird, wird auf diesen Aspekt nicht weiter eingegangen.

⁴⁰Eine Schwerpunktstation ist ein Schalt haus in der MS-Ebene, das von mindestens zwei Leitungen aus dem Umspannwerk versorgt wird.

⁴¹Eckdaten des Netzes enthält Anhang A.2.

Arbeitspunktes (Stark-/Teil-/Schwachlast⁴²) der Netzgruppe haben. Um die Arbeitsbereiche besser unterscheiden zu können, sind sie leicht versetzt in Abbildung 2.14 angeordnet. Verstärkungseffekte werden dabei positiv dargestellt und liegen bei ca. maximal 2 %. Die Abschwächungseffekte besitzen höhere Werte und nehmen mit sinkendem Blindleistungsabruf zu. Dies ist auf den Einfluss des Stufenschalters des HS/MS-Transformators zurück zu führen. Die Änderung des Spannungsniveaus im Netz durch eine Stufenschaltung führt zu einer Änderung der Ladeleistung der MS-Leitungen, die einen nahezu konstanten Wert von ca. 60 kVAr besitzt. Zu gewissen Zeitpunkten der Simulation verursacht der Blindleistungsabruf eine Änderung der Stufenschalterposition. Ein induktiver Blindleistungsabruf bewirkt eine Stufung hin zu einem höheren Spannungsniveau und damit zu einem Anstieg der kapazitiven Ladeleistung, weshalb ein abschwächender Effekt entsteht (kapazitiver Abruf analog). Anzumerken ist, dass die Änderung der Ladeleistung aufgrund einer Schalthandlung des Stufenschalters am HS/MS-Transformator jederzeit auch ohne Blindleistungsabruf möglich ist und somit dieser Effekt immer auftreten kann⁴³. Ein Blindleistungsabruf sollte folglich deutlich höher als dieser Effekt sein, um eine signifikante Wirkung zu erzielen. Die Verstärkungseffekte durch die MS-Leitungen sind mit maximal ca. 2 % vernachlässigbar.

⁴²Die Einteilung nach verschiedenen Arbeitsbereichen erfolgt durch Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der Wirkleistungsbilanz der Netzgruppe. Deutlich sind in dieser Feiertage, Wochenenden und Nachtzeiten genau so wie Werktagen erkennbar, die Schwach- bzw. Starklastfälle definieren. Der Übergang von beiden Situationen wird als Teillast bezeichnet. Den Schwachlastfall beschreiben Arbeitspunkte mit einem Wirkleistungsbezug kleiner gleich 10 MW, den Teillastfall mit einem Wirkleistungsbezug größer 10 MW und kleiner gleich 14 MW und den Starklastfall Arbeitspunkte mit einem Wirkleistungsbezug größer 14 MW.

⁴³Eine Schalthandlung des Stufenschalters wird ausgelöst, wenn die Schaltschwellen (Spannungsgrenzen an der Unterspannungsseite) verletzt werden. Dies kann durch eine Änderung der HS-Spannung oder durch einen geänderten Leistungsfluss über den Transformator (infolgedessen ändert sich auch der Spannungsfall über den Transformator) verursacht werden.

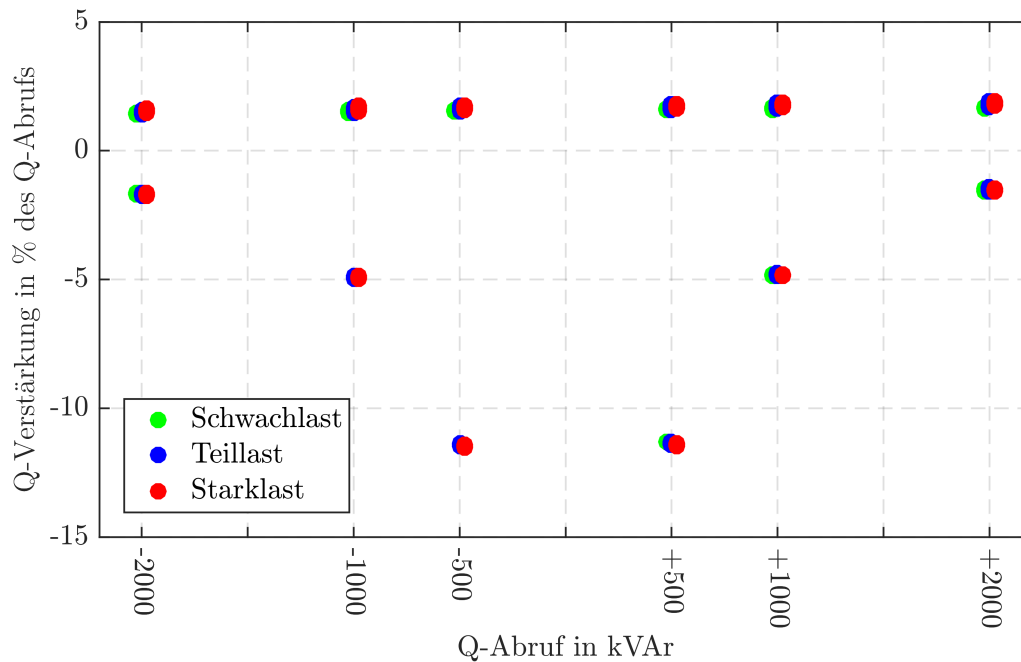


Abbildung 2.14: Prozentuale Verstärkungs- und Abschwächungseffekte bezogen auf den getätigten Blindleistungsabruf im betrachteten MS-Netz.

Spannungsebenenübergreifende Betrachtung

Zur Bewertung der Verstärkungs- und Abschwächungseffekte über mehrere Spannungsebenen hinweg wird ein vereinfachtes Netzmodell mit typischen Leitungstypen, Transformatoren und aktiver Stufenschalterregelung verwendet (siehe Abbildung 2.15). Die angedeuteten Lasten (graue Dreiecke) stellen über ihren Wirk- und Blindleistungsbezug nacheinander verschiedene Arbeitspunkte ein (5 %, 25 % und 50 % der jeweiligen Nennleistung des vorgelagerten Netzbetriebsmittels bei einem induktiven $\cos\varphi$ in Höhe von 1,00 bzw. 0,90). Betrachtet wird weiter ein Wirk- bzw. Blindleistungsabruf⁴⁴ an den vier Lasten mit Anschlusspunkt in der HS/MS-, MS-, MS/NS- und NS-Ebene. Der Wirkleistungs- bzw. Blindleistungsabruf beträgt 10, 4, 0,133 und 0,06 MVar bzw. MW, was ca. jeweils einem Drittel der Nennleistung des höhergelegenen Netzbetriebsmittels entspricht. Die Verstärkungs- und Abschwächungseffekte werden dabei an den sechs grün eingezeichneten Messpunkten (grüne Kreise) ausgewertet.

⁴⁴Es erfolgt nacheinander ein reiner Wirk- bzw. Blindleistungsabruf an jeweils nur einer der vier genannten Lasten.

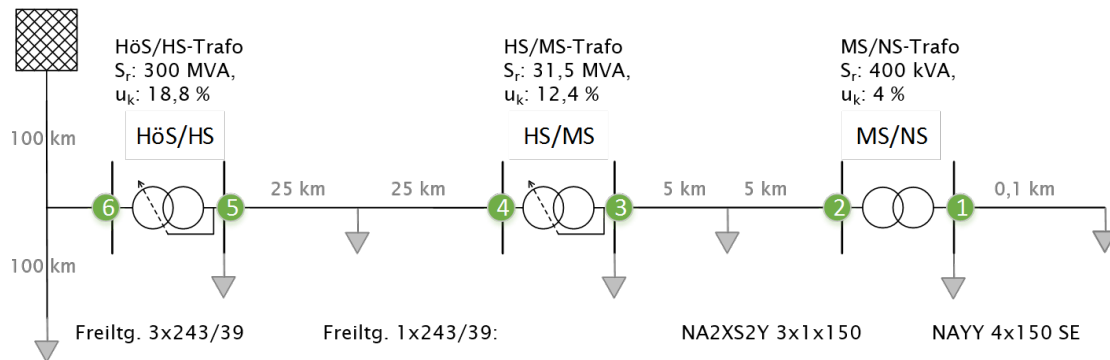


Abbildung 2.15: Modell zur Bewertung der Verstärkungs- und Abschwächungseffekte über mehrere Spannungsebenen hinweg.

Die Auswertung der Wirkleistungsabrufe ergibt, dass es zu einer maximalen Verstärkung von ca. 25 % kommt. Die Höhe hängt dabei ab, von welcher Spannungsebene der Wirkleistungsabruf ausgeht und wie der Arbeitspunkt des Netzes ist. Je niedriger die Spannungsebenen und je höher ausgelastet das Netz, desto größer fällt die Verstärkung aus.

Für den induktiven und kapazitiven Blindleistungsabruf ergeben sich nahezu die gleichen Zusammenhänge, weshalb im Folgenden nicht mehr weiter differenziert wird. Zu beobachten sind neben den Verstärkungseffekten auch leichte Abschwächungseffekte ($\leq 5\%$) bei geringer Netzbelastung. Die Verstärkungseffekte hängen sehr stark von der Netzbelastung ab. Ist diese hoch und besteht ein stark induktives Verhalten, so können Verstärkungseffekte von bis zu ca. 80 % auftreten (bei $\cos\varphi = 1,00$ nur maximal 20 %). Dies liegt daran, dass bei niedrigen $\cos\varphi$ -Werten, das Verhältnis der Scheinleistungsänderung bezogen auf die Blindleistungsänderung gegen eins geht. Da die Netzbetriebsmittel eine überproportionale Blindleistungscharakteristik aufweisen, kommt es zu deutlichen Verstärkungseffekten, wenn hohe Auslastungspunkte in Verbindung mit großen Auslastungsänderungen zusammentreffen. Anzumerken ist, dass der hier gewählte $\cos\varphi = 0,90$ ein extremes Szenario zeigt. Die $\cos\varphi$ -Grenzen an NVP zwischen Netzbetreibern haben i. d. R. minimal den Wert 0,95 und auch Verhältnisse auf den einzelnen Leitungsabschnitten liegen bei Starklast deutlich über einem $\cos\varphi = 0,90$, wie die Auswertung von Messdaten bestätigt (siehe Anhang A.4). Unterstellt man einen $\cos\varphi = 0,95$, so ergibt sich eine maximale Verstärkung von 32 %.

Zu beachten ist weiter, dass es sich hierbei um eine vereinfachte Untersuchung handelt. Der Blindleistungsabruf wird, wie bereits in den vorherigen Abschnitten

beschrieben, nicht nur durch die Auslastung der Netzbetriebsmittel, sondern auch vom freien Spannungsband begrenzt. Die Spannungsgrenzwerte werden hier nicht berücksichtigt und liegen deshalb auch bei hoher Netzauslastung deutlich unter 0,90 p. u. Folglich müsste in der Realität der Blindleistungsabruf eingeschränkt werden, wodurch die Verstärkungseffekte weiter abgeschwächt (vor allem bei hoher Netzlast) würden. Verstärkungseffekte werden primär über den Einfluss von Transformatoren und Freileitungen erzielt. Kabel verhalten sich wegen ihrer geringen Reaktanz deutlich neutraler.

Zwischenfazit

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass bei normalen Auslastungssituationen die Verstärkungseffekte beim Abruf von Blindleistung mit denen von Wirkleistung vergleichbar sind und unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Abschnitt 2.4.3 ein zur Wirkleistung analoger Blindleistungstransport denkbar ist. Realitätsnahe Blindleistungsabrufe vermeiden hierbei bereits intrinsisch ungewünscht hohe Verstärkungseffekte, da sie i. d. R. das Ziel verfolgen Blindleistung lokal zu kompensieren. Erwähnenswert ist, dass der heutige Stromnetzaufbau „wirkleistungsoptimiert“ ist. Sollen große Mengen von Blindleistung abgerufen werden, so sind Netze bzw. Spannungsebenen mit hohem Verkabelungsgrad zu bevorzugen, da sich diese neutraler hinsichtlich der Verstärkungseffekte verhalten als Netze mit Freileitungen. Die hier vorgestellte Untersuchung wurde vom Verfasser dieser Arbeit in Auszügen bereits in einem Konferenzbeitrag [6] veröffentlicht und fanden Eingang in die Studie [38].

2.4.5 Diskussion der Arbeitspunktmodellierung von EZA und Lasten

Über die Vorgabe von Arbeitspunkten von EZA und Lasten stellen sich Ströme über Kantenelemente und Spannungen an Knotenelementen des Netzmodells im Rahmen der stationären Lastflussberechnung ein (siehe Abschnitt 2.4.1). Ziel dabei ist es bislang, die auslegungsrelevanten Arbeitspunkte des Netzes nachzustellen, um darauf basierend das Netz auszulegen und so einen sicheren Netzbetrieb zu gewährleisten. Hierbei ist die Netzplanung aufgrund von wirtschaftlichen Randbedingungen im Konflikt zwischen einer sicheren Auslegung und der Vermeidung einer Überdimensionierung des Netzes.

Die sicherste Netzauslegung erfolgt basierend auf Worst-Case-Szenarien mit Planungswerten für Wirk- und Blindleistungsarbeitspunkte von Lasten und EZA. Für Stromnetze sind dies im ungestörten Betrieb der Einspeisefall und der Starklastfall, in Summe also zwei Arbeitspunkte des Netzes. Beim Einspeisefall werden Lasten vernachlässigt und nur EZA berücksichtigt. Infolge dessen kommt es zur maximalen Spannungsanhebung und zum größtmöglichen Leistungsfluss in die überlagerte Netzebene. Bei Starklastfall werden EZA vernachlässigt und nur die Lasten bewertet. Hier stellt sich der maximale Spannungsfall und größte Leistungsbezug vom überlagerten Netz ein. Offensichtlich ist, dass dieser Ansatz sicher ist, aber zur Überdimensionierung des Netzes führt, da sich die Realität zwischen beiden Betriebspunkten abspielt. Besonders in der MS- und NS-Ebene ist aufgrund der geringen vorhandenen Messtechnik und der hohen Volatilität der einzelnen oder kleinen Gruppen von Verbrauchern und EZA eine exakte Modellierung bislang nicht möglich.

Zur Vermeidung bzw. Reduzierung einer Überdimensionierung werden die Worst-Case-Szenarien üblicherweise um verschiedene Ansätze erweitert:

- Anwendung von Gleichzeitigkeitsfaktoren⁴⁵ für Lasten und EZA⁴⁶ (siehe z. B. [57, 58, 59]).
- Berücksichtigung minimal anrechenbarer Leistungen aus Lasten bzw. EZA.
- Mischbetrachtungen, z. B. Starklast mit niedriger Erzeugung oder Schwachlast mit hoher Erzeugung.
- Verwendung von verfügbaren realen Messdaten abweichend von Planungswerten (z. B. Verwendung des maximalen Leistungsbezugs einer Last anstelle der vereinbarten Übergabeleistung).

Andere Modellierungsansätze verwenden Zeitreihen oder probabilistische Modelle zur Arbeitspunktmodellierung von EZA und Lasten, was zur Betrachtung und Bewertung einer größeren Anzahl an Arbeitspunkten führt:

- **Zeitreihen** sind eine Aneinanderreihung von Wirk- und Blindleistungsarbeitspunkten mit diskreter Schrittweite, die bei der Lastflussberechnung in

⁴⁵Der Gleichzeitigkeitsfaktoren beschreibt das Verhältnis zwischen der maximal aufgetretenen und der installierten Leistung bzw. vereinbarten Übergabeleistung.

⁴⁶Übliche Praxiswerte für den Gleichzeitigkeitsfaktor von PV sind 1,00 für NS-Netze und 0,85 für MS-Netze. Für Biomasseanlagen wurden Untersuchungen im Projekt [2] durchgeführt, bei denen sich ein Gleichzeitigkeitsfaktor von ca. 85 % ableiten lässt, siehe [7].

benutzerdefinierter oder chronologischer Reihenfolge analysiert werden können. Sie ermöglichen auch eine energetische Bewertung (z. B. Verlustenergie) des jeweiligen Netzes. Zur Erstellung des Zeitverhaltens wird i. d. R. auf Messdaten (z. B. von RLM-Kunden) aus der Vergangenheit oder alternativ auf synthetische generierte Profile zurückgegriffen (siehe z. B. [57]). Messdaten bieten den Vorteil, dass sie vorhandene Korrelationen im Messzeitraum bereits berücksichtigen. Anschlusspunkte von Lasten ohne Messeinrichtung⁴⁷ werden meist über Standardlastprofile (SLP) nachgebildet. Diese dienen primär der energetischen Planung von Bilanzkreisen und beschreiben normierte Wirkleistungszeitreihen für verschiedene Verbrauchertypen, siehe [60]. Zur Nachbildung des Blindleistungsverhaltens von SLP-Kunden bestehen derzeit keine vergleichbaren standardisierten Zeitreihen. In [61] werden basierend auf Messdaten und abgeleiteten Gewichtungsfaktoren Blindleistungs-SLP erzeugt. Allerdings lässt der Lastgang für Haushalte an Werktagen, bei denen der $\cos\varphi$ nachmittags unter einen Wert von 0,96 induktiv fällt, an der Repräsentativität der Ergebnisse zweifeln, wenn man Vergleiche mit [62, 63] zieht. In der Praxis wird deshalb oft auf feste $\cos\varphi$ -Werte zurückgegriffen⁴⁸. EZA werden über Messdaten, idealisierte Zeitreihen (z. B. “Glockenkurve“ für PV) oder Anlagenmodelle (z. B. PV-Modelle, die über die Stunde des Jahres, Ort und Anlagenausrichtung die Einspeiseleistung ermitteln) nachgebildet.

- Beim **probabilistischen** Ansatz steht die Abbildung möglichst aller möglichen Arbeitspunkte von Lasten und EZA im Vordergrund, was beispielsweise mit Messzeitreihen von Erzeugungsanlagen nicht gegeben ist, da sie nur einen Ausschnitt des möglichen Verhaltens zeigen. Statistische Auswertungen erlauben hierbei eine wahrscheinlichkeitstheoretische Beschreibung des Last- und EZA-Verhaltens (z. B. Verteilungsfunktionen für die Wirkleistungseinspeisung einer WEA). Von entscheidender Bedeutung ist dabei, die Verwendung repräsentativer Eingangsdaten und die Berücksichtigung aller Beziehungen zwischen verschiedenen Parametern (z. B. örtliche Verteilung und Dominanz von EZA bzw. Lasten, Jahreszeit oder Umgebungstemperatur) und vor allem die Abhängigkeit verschiedener Netzelemente untereinander (beispielsweise kann keine 100%ige statistische Unabhängigkeit

⁴⁷Lasten ohne Messeinrichtung sind i. d. R. Verbraucher mit einem Jahresenergieverbrauch unter 100.000 kWh (über 100.000 kWh werden RLM eingesetzt) oder Ersatzlasten, die Verbraucherkollektive, z. B. NS-Lasten, darstellen.

⁴⁸Im Extremfall werden die $\cos\varphi$ -Grenzwerte der TAB zur Nachbildung des Blindleistungsverhaltens von Lasten verwendet.

zwischen PV-Anlagen in einem MS-Netz unterstellt werden.). Bei der Lastflussberechnung wird üblicherweise eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt, bei der eine Vielzahl an zufällig gewählten Betriebspunkten generiert wird. Abschließend wird die Einhaltung von Grenzwerten anhand von Wahrscheinlichkeitsniveaus einzelner Bewertungsgrößen (z. B. 98%-Wahrscheinlichkeitswert der maximalen Knotenspannung an einem Netzknoten) bewertet.

Zwischenfazit

Im Fokus all dieser Modellierungsvarianten steht die Nachbildung der auslegungsrelevanten Netzbetriebsfälle über die ggf. ein notwendiger Netzausbaubedarf aus Sicht von Strom- und Spannungsrestriktionen ermittelt wird. Die gezielte Überprüfung der Blindleistungsbilanz bzw. die Analyse ihrer Zusammensetzung im Sinn der in [5] genannten Systemanalyse ist damit nicht abgedeckt. Für diese ist eine möglichst realistische Nachbildung der Leistungsflüsse im MS-Netz erforderlich, weshalb im Rahmen dieser Arbeit zeitreihenbasierte Modelle für die Evaluierung des in Kapitel 3 vorgestellten Steuerungsverfahrens verwendet werden. Die dabei verwendeten Modellierungsschritte und grundlegenden Netzmodelle wurden im Forschungsprojekt [2] erarbeitet und evaluiert (siehe z. B. [62, 63]).

2.5 Beschreibung des Einsatzes und Diskussion des Blindleistungspotenzials von Mittelspannungsbetrieben mit betrieblichen Kompensationsanlagen

Im Folgenden werden relevante Aspekte zur Ausführung, zum Betrieb und zum Potenzial von BKA erläutert. Auf eine ausführliche Beschreibung der Grundlagen zur Blindleistungskompensation wird verzichtet und stattdessen auf [64] verwiesen.

2.5.1 Aufbau von betrieblichen Kompensationsanlagen

Können die in den TAB definierten Grenzwerte⁴⁹ aus Abschnitt 2.2.3 nicht eingehalten werden, sind die Anschlussnehmer dazu verpflichtet, geeignete Kompensationsmaßnahmen zu ergreifen. Eine konventionelle Kompensationsanlage besteht dabei aus einem oder mehreren Blindwiderständen⁵⁰ (Spule oder Kondensator), die parallel oder in Serie an das blindleistungsverursachende Element (z. B. induktiv wirkender Antrieb, kapazitiv wirkendes Kabel) angeschlossen und über einen Regler zu- bzw. abgeschaltet⁵¹ werden. Bei den in dieser Arbeit fokussierten MS-Betrieben werden heute ausschließlich Kompensationsanlagen mit Kondensatoren zur Reduzierung des bestehenden induktiven Blindleistungsbedarfs⁵² installiert. Neben konventionellen Kompensationsanlagen gibt es auch aktive Filter. Diese Systeme können neben einer hochdynamischen⁵³ Blindleistungskompensation zur Verbesserung der Spannungsqualität eingesetzt werden, da sie Oberschwingungen kompensieren und Spannungsunsymmetrien ausgleichen können. Bei Erzeugungsanlagen⁵⁴ werden i. d. R. die vorhandenen Wechselrichter zur Blindleistungsbereitstellung genutzt und/oder zusätzliche konventionelle Kompensationsanlagen installiert. Bei größeren Anlagen steht hier nicht nur die Spannungshaltung im Vordergrund, sondern auch die Kompensation der Anlagenverkabelung. Beispielsweise wird eine kapazitive Ladeleistung einer Windparkverkabelung durch den Parkregler kompensiert, da dieser das Blindleistungsverhalten am NVP als Regelgröße verwendet.

Um Reihen- oder Parallelresonanzen zwischen der Kompensationsanlage und der Netzimpedanz⁵⁵ zu vermeiden, werden heutzutage neue Kompensationsanlagen

⁴⁹Neben einzuhaltenden TAB-Grenzwerten können auch Blindenergiefreimengen, die in Stromlieferverträgen definiert werden, ein Installationsgrund sein. Ein weiterer möglicher Installationsgrund für BKA ist die Verbesserung der Spannungsqualität (Einsatz als „Filter“).

⁵⁰Besteht eine BKA aus mehreren Blindwiderständen werden diese als einzelne Stufen der Kompensationsanlagen bezeichnet. Eine Stufe beinhaltet dann bei kapazitiven Stufen je Phase einen Kondensator, eine Drosselspule und Entladewiderstände.

⁵¹Zu- bzw. abgeschaltet werden die Stufen einer BKA i. d. R. über Schütze. Bei dynamischen Prozessen kommen Anlagen mit Thyristoren zum Einsatz.

⁵²Der induktive Bedarf bei Betrieben entsteht beispielsweise durch Asynchronmotoren. Aber auch durch Drosselspulen, Schweißgeräte und Beleuchtungsanlagen resultiert Bedarf. Einen ausführlichen Überblick gibt [64].

⁵³Bei aktiven Filtern findet die Kompensation innerhalb einer Netzperiode statt.

⁵⁴Analog zu EZA können Wechselrichter von Speichern oder zukünftig die Ladeinfrastruktur der Elektromobilität zur Blindleistungsbereitstellung genutzt werden.

⁵⁵Die Netzimpedanz setzt sich aus den Impedanzen der Leitungen und Transformatoren zusammen, wobei die Induktivität der Transformatoren i. d. R. den dominierenden Anteil darstellt.

durchwegs verdrosselt ausgeführt⁵⁶. Durch die entsprechende Abstimmung der Verdrosselung lässt sich die Resonanzfrequenz des Reihenschwingkreises unterhalb der niedrigsten vorkommenden Oberschwingungsfrequenz legen. Der Reihenschwingkreis wirkt so unterhalb der Resonanzfrequenz kapazitiv⁵⁷ und kann zur Kompensation der Verschiebungsblindleistung genutzt werden. Oberhalb der Resonanzfrequenz wirkt er als Ganzes induktiv und kann somit keine Resonanzen mehr mit anderen Netzinduktivitäten ausbilden. Um unerwünschte Oberschwingungen zu reduzieren, können einzelne Stufen gezielt als Oberschwingungsfilter genutzt werden. Von abgestimmten Filtern spricht man, wenn die Resonanzfrequenz auf eine Harmonische ausgelegt wird. Von verstimmten Filterkreisen, wenn die Blindleistungskompensation im Vordergrund steht. Bei Nutzung mehrerer Filterkreise müssen Parallelresonanzen vermieden werden. Wird Blindleistung „aktiv“ (z. B. aktive Filter, Wechselrichter) bereitgestellt, so besteht aufgrund der Regelung der Komponente⁵⁸ kein Einfluss auf die Netzstruktur hinsichtlich der Resonanzpunkte, was ein Vorteil dieser Technologie ist. Resonanzeffekte werden im Weiteren nicht betrachtet, da bestehende Anlagen im Fokus dieser Arbeit stehen und die Verdrosselung der Anlage Bestandteil der Anlagenauslegung beim Neubau ist. Neben dem Hardwareschutz (Verdrosselung) der BKA sind in deren Regler weitere Schutzmechanismen implementiert. So wird die Stromaufnahme inklusive der Oberschwingungsbelastung je Stufe, die Stufenkapazität⁵⁹, die Umgebungstemperatur und die Spannung⁶⁰ erfasst. Bei Grenzwertüberschreitungen werden die BKA oder einzelne Stufen abgeschaltet. Ein gezielter kapazitiver Blindleistungsabruf führt zur Erhöhung der Spannung. Hierbei muss sichergestellt werden, dass die Spannung an der BKA unter dem genannten Grenzwert liegt. Befinden sich EZA im Netz der BKA, muss darüber hinaus ein zusätzli-

⁵⁶Die Angaben zur Verdrosselung basieren auf Herstellerangaben der Firmen FRAKO Kondensatoren- und Anlagenbau GmbH und KBR GmbH. Typische Werte des Verdrosselungsgrades sind 7 oder 14 %. Bei verdrosselten Stufen wandelt eine zum Kondensator in Reihe geschaltete Spule den rein kapazitiven Abzweig in einen Schwingkreis mit einer festen Reihenschwingkreisfrequenz um. Über den Verdrosselungsgrad p (induktive geteilt durch kapazitive Impedanz, bei Nennfrequenz des Netzes in Prozent angegeben) lässt sich die Resonanzfrequenz und damit das Verhalten der Kondensator-Drossel-Kombination im Netz beeinflussen.

⁵⁷Bei BKA ist die Verdrosselung und damit die Induktivität der vorgeschalteten Spule, bereits in der Angabe der Stufennennleistung mit eingerechnet.

⁵⁸Anders als „passive“ Elemente (z. B. Spulen oder Kondensatoren) sind „aktive“ Kompensationsanlagen nicht als Impedanz, sondern je nach Ausführungsform als Strom- bzw. Spannungsquelle zu verstehen. Zwar besitzen sie am Ausgang passive Bauelemente (z. B. Drosselspulen in Filterkreisen), doch durch die aktive Bedämpfung der Anlagenregelung entstehen keine Resonanzeffekte.

⁵⁹Die Kondensatorkapazität einer BKA-Stufe nimmt durch Alterungseffekte ab, wodurch sich die Resonanzfrequenz der Stufe ändert.

⁶⁰Zum Schutz der BKA-Kondensatoren vor Überspannung erfolgt eine Abschaltung der BKA bei einer Spannung von üblicherweise 1,10 p. u.

ches Spannungsband für die Spannungsanhebung der EZA berücksichtigt werden.

Als Kompensationsarten kommen die Einzel-, Gruppen- und Zentralkompensation zum Einsatz. Sie unterscheiden sich darin, wie viele Blindleistungsverbraucher über die Kompensationsanlage kompensiert werden. Bei MS-Betrieben wird überwiegend die Zentralkompensation eingesetzt. Hierbei werden Kompensationsanlagen an Niederspannungshauptverteilungen installiert, die die parallelen betriebsinternen NS-Netze kompensieren. Der Messpunkt der Kompensationsanlage erfasst die Summenlast an der Unterspannungsseite des MS/NS-Transformators. Der Blindleistungsbedarf des Transformators und der betriebseigenen MS-Kabel bleibt somit heute üblicherweise unberücksichtigt. Die in [2] analysierten MS-Betriebe sind durchgängig redundant und teilweise (n-1)-sicher ausgelegt, was zu geringen Betriebsmittelauslastungen im Normalbetrieb führt. Typisch sind hierbei offene MS-Ringe, parallele MS/NS-Transformatoren und in Ausnahmefällen geschlossene NS-Ringe.

2.5.2 Regelung von betrieblichen Kompensationsanlagen

Heutige konventionelle BKA besitzen i. d. R. eine einphasige Messung über die Spannung und Strom bzw. Wirk- und Blindleistung erfasst werden. Mittels eines parametrierbaren Ziel- $\cos\varphi$ ⁶¹ wird ermittelt, wie viel Kompensationsleistung zugeschaltet bzw. abgeschaltet werden soll. Die Kompensationsleistung ist dabei in diskreten Stufen verfügbar. Der Diskretisierungsfehler ist über die kleinste Stufe der BKA definiert. Die Ansteuerung der Stufen erfolgt dreiphasig, also symmetrisch für alle Außenleiter.

Die herstellersistemspezifische Regelung der BKA erfolgt innerhalb deutlich kleinerer Zeitintervalle, als die in der Energietechnik oftmals zugrunde gelegten 10-Minuten- oder 15-Minuten-Mittelwerte. Die Befragung eines BKA-Herstellers ergab beispielsweise, dass alle 80 ms die Einhaltung des Ziel- $\cos\varphi$ überprüft wird. Ist ein Toleranzband überschritten, werden Kompensationsstufen zu-/abgeschaltet. Nach einer Schaltung wird eine Totzeit von 8 Sekunden eingehalten um Einschwingvorgängen Zeit zu geben und abgeschaltete Kondensatoren zu entladen.

⁶¹Der Ziel- $\cos\varphi$ in BKA liegt für gewöhnlich bei 0,98 und somit über den TAB-Grenzwerten. Primär wird dies damit begründet, dass Auswirkungen von Blindleistungsflüssen auf die Spannungshaltung und die Verluste auf betriebsinternen Leitungen und Transformatoren reduziert werden.

Ist nach dieser Totzeit der Ziel- $\cos\varphi$ weiter verletzt, wird erneut eine Schalthandlung initiiert bis ein ausgeregelter Zustand (Ziel- $\cos\varphi$ innerhalb Toleranzband) erreicht wird. Danach läuft eine zweite Totzeit (20 Sekunden) ab, bevor der Regler wieder aktiv agiert⁶². Eine Regelung auf die $\frac{1}{4}$ -Stunde des Energieabrechnungssystems erfolgt somit nicht.

2.5.3 Blindleistungspotenzial von betrieblichen Kompensationsanlagen

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit stehen konventionelle BKA im Fokus, da diese heute überwiegend bei MS-Betrieben vorzufinden sind. Das Blindleistungspotenzial der BKA ist definiert über die zugeschalteten bzw. abgeschalteten Kompensationsstufen:

- **Induktives Potenzial** („untererregt“) ist gegeben durch aktive Stufen, die abgeschaltet werden können. Hierdurch wird das Blindleistungsverhalten des Betriebs induktiver.
- **Kapazitives Potenzial** („übererregt“) ist gegeben durch inaktive Stufen, die zugeschaltet werden können. Hierdurch wird das Blindleistungsverhalten des Betriebs kapazitiver.

Im Zuge des Forschungsprojektes [2] fanden zahlreiche Gespräche mit technischen Ansprechpartnern und Messungen an MS-Betrieben aus verschiedensten Branchen statt. Hierbei konnte ein genereller Trend festgestellt werden, der beschreibt, dass die installierte BKA-Leistung häufig aufgrund eines stark rückläufigen induktiven Bedarfs überdimensioniert ist. Als Grund hierfür wird die steigende Anzahl an geregelten „großen“ Antrieben angegeben sowie die Erneuerung von Beleuchtungsmitteln⁶³ genannt. Anzumerken ist, dass, wie bereits in Studie [3] aufgeführt, MS-Betriebe über ein Nachrüstpotenzial verfügen, da zentrale netzbetreibereigene Kompensationsanlagen einen deutlich größeren Platzbedarf als einzelne „kleine“ BKA aufweisen. Ein weiterer Vorteil ist die Kleinteiligkeit der nutzbaren Kompensationsleistung, wodurch der Blindleistungsbedarf theoretisch genauer als bei einer großen Kompensationsanlage mit diskreten Stufen

⁶²Bei Schützen wird von 80.000 möglichen Schaltspielen ausgegangen, bevor diese getauscht werden müssen, weshalb durch Totzeiten der Regelung ein übermäßiges Schalten verhindert werden soll.

⁶³Bei der Erneuerung der Beleuchtung erfolgt meist ein Ersatz von Entladungslampen mit Drosselspulen durch Leuchtmittel mit elektronischem Vorschaltgerät.

ausgeregelt werden könnte. Netzbetreibereigene stetig regelbare BKA wären hier vorteilhaft, sind aber mit deutlich höheren Investitionskosten verbunden (siehe Studie [39]).

Zwischenfazit

Betriebe mit BKA sind somit als potenzielle Blindleistungsquellen zu verstehen und können netzdienlich agieren, indem sie von der bisher üblichen starren Kompensationsvorgabe abweichen. Wird induktives oder kapazitives Blindleistungspotenzial aus einer BKA netzdienlich abgerufen, so wird dadurch auch die Spannungshaltung und Betriebsmittelauslastung im Netz des Betriebs beeinflusst. Ein Steuerungskonzept für BKA muss folglich berücksichtigen, dass Spannungs- und Auslastungsgrenzen einzuhalten sind. Als Blindleistungsquellen sind primär konventionelle BKA zu verstehen, die in größerer Anzahl und verteilt in einem Betrieb vorkommen können. Aber auch blindleistungsfähige Wechselrichter oder Speicher können zukünftig hierunter verstanden werden. Zur Koordination des Blindleistungsabrufs innerhalb des Betriebs und zur Überwachung der internen Netzrestriktionen erscheint eine zentrale Regeleinheit beim Betrieb als notwendig.

2.6 Zusammenfassung der Aufgabenstellung und der darüber abgeleiteten Anforderungen an ein Steuerungsverfahren für Blindleistungsquellen

Im Folgenden werden die Ergebnisse (die wichtigsten sind hervorgehoben) der Aufgabendiskussion dieses Kapitels zusammengefasst, die die Anforderungen an ein Steuerungsverfahren für Blindleistungsquellen in Mittelspannungsnetzen beschreiben.

Ordnungsrahmen und Regelwerke:

- Die in § 1 Abs. 1 EnWG definierte Forderung nach einer sicheren, preisgünstigen, verbraucherfreundlichen, effizienten und umweltverträglichen leitungsgebundenen Versorgung lässt den Schluss zu, dass die **Auswahl geeigneter Blindleistungsquellen technologieoffen und bedarfsabhängig** erfolgen muss. Dies bedingt, dass die Bewertung des Netzausbaubedarfs

zukünftig eine detailliertere Nachbildung der Blindleistungsflüsse und eine Potenzialberücksichtigung von Blindleistungsquellen enthält.

- **Blindleistungsgrenzen** für Verbraucher und Blindleistungsanforderungen an EZA sollten **nicht pauschal definiert** werden, da dies den Ansprüchen nach § 1 Abs. 1 EnWG nicht genügt und zudem ungenutzte Blindleistungspotenziale (siehe Studie [9]) und eine Ungleichbehandlung von EZA und Verbrauchsanlagen zur Folge hat. Dies gilt auch für netzbetreiberspezifische TAB-Ergänzungen.
- Nach § 17 Abs. 1 EnWG sind Letztverbraucher zu technischen und wirtschaftlichen Bedingungen an das Stromnetz anzuschließen. Der Beschluss der BNetzA in [36] zeigt, dass hierbei nicht „willkürliche“ **Bestimmungen zum Netzanschluss** formuliert werden dürfen, sondern eine **technische und wirtschaftliche Notwendigkeit die Basis** bilden muss. Speziell für die Ausgestaltung von Blindleistungsgrenzen sollte aus technischer Sicht die Wechselwirkung von Blindleistungsflüssen und Spannungshaltung im Vordergrund stehen. Die heutige Praxis mit pauschalen Vorgaben könnte dieser Überlegung widersprechen.
- Die aktuellen TAB-Anforderungen für Mischbetriebe sind teilweise konträr, weshalb ein Steuerungsverfahren für Blindleistungsquellen auch diesen Anlagentyp mit berücksichtigen sollte.

Grundlagen MS-Netze:

- Die Durchdringung von Mess- und Kommunikationstechnik in der MS-Ebene ist deutlich geringer als in den überlagerten Spannungsebenen. Um das Blindleistungspotenzial von Blindleistungsquellen mit Anschlusspunkt in der MS-Ebene zu heben, erscheint es deshalb zielführend, einen **dezentralen Ansatz** zu wählen. Dieser sollte die verteilten bzw. dezentral in der MS-Ebene angeschlossenen Blindleistungsquellen berücksichtigen und ohne einen aufwändigen Ausbau der Mess- und einem Minimum an Kommunikationstechnik auskommen.
- MS-Netze können unterschiedlich Ausprägungen der Wirk-Blindleistungsbilanz aufweisen, weshalb pauschale/einheitliche Lösungsansätze nicht zielführend sind. Ein Steuerungsverfahren für Blindleistungsquellen muss deshalb über eine **netzgruppenspezifische Bewertung** den Blindleistungsbedarf und geeignete Blindleistungsquellen identifizieren.

Aspekte der Netzplanung:

- Der Blindleistungshaushalt eines MS-Netzes und dessen Beeinflussungsmöglichkeiten werden bislang nur rudimentär betrachtet. Diese **Planungslücke soll durch das Steuerungsverfahren geschlossen** werden. Hierbei soll nicht nur Blindleistung gezielt eingesetzt, sondern ggf. auch die Vorhaltung optimiert werden. Da die Netztopologie und die Verteilung von EZA und Lasten von Netz zu Netz sehr unterschiedlich sind, sollte das Steuerungsverfahren auf einer netzspezifischen Bewertung basieren.
- Die Identifikation von geeigneten Blindleistungsquellen und Steuerungsparametern sollte aufgrund der Komplexität in einem **teilautomatisierten Prozess im Rahmen der simulationsgestützten Netzbewertung** einbindbar sein. Die Bestimmung der Parameter sollte einfach und zyklisch wiederholbar sein, um den Blindleistungseinsatz und langfristig die Blindleistungsvorhaltung zu minimieren.
- **Grenzwerte der Spannungshaltung und der Betriebsmittelauslastung** müssen **berücksichtigt** werden. Hierbei kann es sinnvoll sein, leitungs- und knotenscharfe Auswertungen durchzuführen. Aus Sicht der Spannungshaltung sind speziell die Regelbereiche von Stelltransformatoren mit abzubilden. Der zu erwartende Effekt auf die Betriebsmittelauslastung wird bei Betrachtung heute typischer $\frac{Q}{P}$ -Verhältnisse (Blindleistungsreduzierung im Fokus „ $Q \rightarrow 0$ “) als gering eingeschätzt. Durch einen vermehrten Blindleistungsabruf können sich aber zukünftig auch höhere Verhältnisse einstellen (z. B. durch Blindleistungsbreitstellung zum Bilanzausgleich anderer Netze), weshalb die Betriebsmittelauslastung im Steuerungsverfahren ein zu berücksichtigender Faktor sein muss. Analoges gilt für Verstärkungs-/Abschwächungseffekte beim Blindleistungsabruf, die bei heutigen Wirk-/Blindleistungsverhältnissen in der gleichen Größenordnung wie die der Wirkleistungsabrufe liegen.
- Die simulationsgestützte Netzbewertung erfolgt unter Verwendung verschiedenster Varianten der Arbeitspunktmodellierung. Das Steuerungsverfahren sollte entsprechend flexibel „andockbar“ sein.

Betriebliche Kompensationsanlagen:

- Das **Potenzial von Betrieben mit Kompensationsanlagen** sollte berücksichtigt und somit ein **technologieoffenes Verfahren** beschrieben werden. Starre, konstante Kompensationsvorgaben sind i. d. R. nicht zielführend.

- Netzrestriktionen (Spannungshaltung und Betriebsmittelauslastung) im Netz des MS-Betriebs müssen berücksichtigt werden.
- Zur Koordination des Blindleistungsabrufs innerhalb des Betriebs und zur Überwachung der internen Netzrestriktionen erscheint eine zentrale Regelungseinheit beim Betrieb als notwendig. Die Planungsgrenze des Netzbetreibers ist somit nach wie vor der NVP eines Betriebs.

Abschließend sollen die Ergebnisse der geführten Diskussion im Hinblick auf die im FNN-Hinweis [5] beschriebenen Prozesse diskutiert werden. Wichtigste Erkenntnis ist, dass der Einsatz und die Vorhaltung von Blindleistung technologieoffen und bedarfsgerecht erfolgen sollte. Um diesen Forderungen nachzukommen, sollten die Prozesse Systemanalyse und Blindleistungsmanagement aus dem FNN-Hinweis [5], die in Abbildung 2.16 in blau dargestellt sind, erweitert werden. Wichtig ist eine zyklische Bewertung und Rückkopplung der Bewertungsergebnisse des Blindleistungsmanagements (grün eingezeichnet), um unnötige Blindleistungsvorhaltung und unnötigen Blindleistungseinsatz zu vermeiden. Ergänzt wird deshalb eine Analyse des Blindleistungspotenzialeinsatzes, über die bestimmt wird, in welchem Umfang die aufgrund der in TAB formulierten Forderungen vorgehaltene Blindleistungsfähigkeit (z. B. die von EZA) in einem Netz genutzt wird. Durch die Verbindung der Bewertungsergebnisse mit Netzstrukturmerkmalen⁶⁴ und durch den Aufbau einer entsprechenden Datenbasis können die TAB-Anforderungen sukzessiv und „netztypspezifisch“ nachgeführt werden. Dieser Aspekt wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter vertieft, da eine entsprechende Datengrundlage erst erarbeitet werden muss und der hier gewählte Fokus auf der technischen Bewertung und Koordination eines Blindleistungsabrufs durch ein Steuerungsverfahren für Blindleistungsquellen der MS-Ebene liegt, was im Weiteren näher erläutert wird.

⁶⁴Erste Untersuchungen zu diesem Aspekt wurden vom Verfasser dieser Arbeit in [65] vorgestellt.

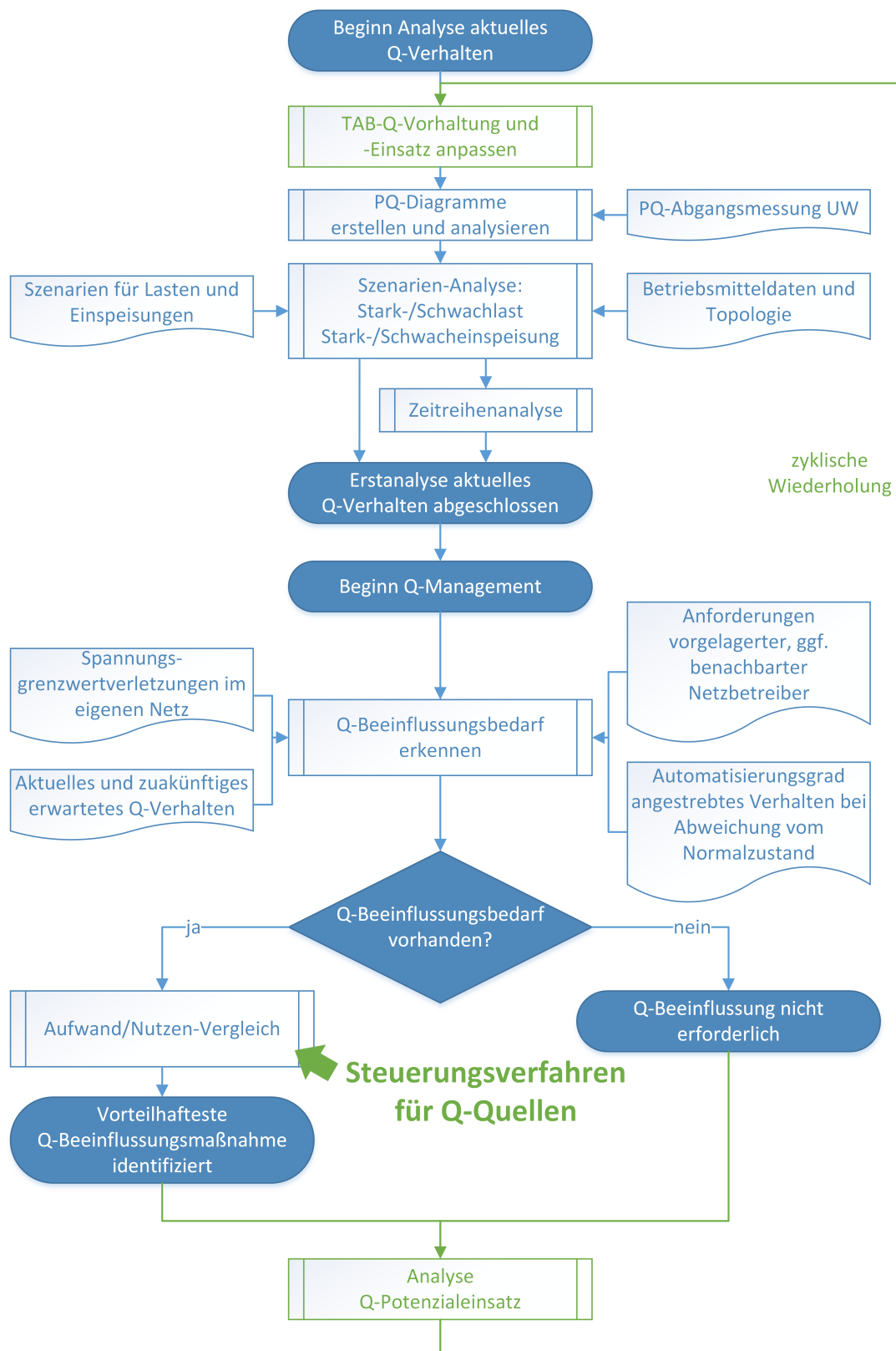


Abbildung 2.16: Kombinierte Darstellung der Prozesse „Systemanalyse“ und „Blindleistungsmanagement“ aus [5] in blau, mit in grün dargestellten Schnittstellen bzw. Erweiterungen bezüglich der vorliegenden Arbeit.

Kapitel 3

Entwicklung eines Steuerungsverfahrens für Blindleistungsquellen in Mittelspannungsnetzen

Dieses Kapitel beschreibt in Abschnitt 3.1 zunächst ein abgeleitetes allgemeines Lösungskonzept, das im Weiteren als „dezentrale Blindleistungsregelung“ bezeichnet wird. Dieses beinhaltet auch das in dieser Arbeit entwickelte Steuerungsverfahren für Blindleistungsquellen. Das Steuerungsverfahren konzentriert sich auf Aspekte der Netzplanung, d. h. auf die Ermittlung der Steuerparameter, weshalb der erste einleitende Abschnitt zunächst einen Überblick über alle weiteren angrenzenden Bereiche gibt, die im Rahmen dieser Arbeit nicht alle ausführlich behandelt werden können. Als Blindleistungsquellentyp werden in den folgenden Abschnitten primär BKA betrachtet, da diese im Sinne von „flexiblen“ Blindleistungsquellen bis dato nahezu unberücksichtigt in der Netzplanung sind. Das Verfahren wird allerdings allgemeingültig formuliert, sodass auch andere Blindleistungsquellentypen (z. B. blindleistungsfähige EZA) eingebunden werden können.

In den darauf folgenden Abschnitten wird näher auf die Entwicklung des im Fokus dieser Arbeit stehenden Steuerungsverfahrens und dessen einzelner Bestandteile eingegangen. Abschnitt 3.2 leitet die methodischen Grundlagen anhand der Netz-Sensitivitäts- und -Restriktionsanalyse her, die in Abschnitt 3.3 zur Formulierung des Algorithmus zur Koordination eines gleichzeitigen Blindleistungsabrufs

aus mehreren Blindleistungsquellen herangezogen werden. Weiter diskutiert Abschnitt 3.4 ein Modell zur Prognose des Blindleistungspotenzials von MS-Betrieben, die im Zuge dieser Arbeit als potenzielle Blindleistungsquellen erachtet werden.

3.1 Beschreibung des entwickelten Lösungskonzeptes

Auf Basis der in Kapitel 2 geführten Diskussion wird in diesem Abschnitt die „dezentrale Blindleistungsregelung“ und ihre Bestandteile überblicksweise beschrieben. Abschließend wird in Abschnitt 3.1.3 näher auf das Steuerungsverfahren und dessen einzelne Verfahrensschritte eingegangen, das den eigentlichen Kern dieser Arbeit repräsentiert.

3.1.1 Beschreibung der dezentralen Blindleistungsregelung mit integriertem Steuerungsverfahren für Blindleistungsquellen

Vorrangiges Ziel der dezentralen Blindleistungsregelung ist es, technologieoffen bislang ungenutzte Blindleistungspotenziale in der MS-Ebene zu heben, um mit diesen eine Verbesserung der Blindleistungsbilanz eines MS-Netzes ohne i. d. R. aufwändige Nachrüstung von Messtechnik und einem Minimum an Kommunikationstechnik zu bewerkstelligen. In Abbildung 3.1 ist das Lösungskonzept am Beispiel des Blindleistungsquellentyps BKA illustriert.

Um Blindleistung netzdienlich für einen Blindleistungsbilanzausgleich bereitstellen zu können, muss der Blindleistungsbedarf Q_{Bedarf} , d. h. die Differenz von Sollwert Q_{Soll} ⁶⁵ zu Istwert Q_{Ist} der Blindleistungsbilanz der Netzgruppe, zum jeweiligen Zeitpunkt bestimmt und an die Blindleistungsquellen übermittelt werden. Die Schnittstelle zwischen Netz und Blindleistungsquelle ist der

⁶⁵Da die Blindleistung induktive als auch kapazitive Werte annehmen kann, ist je Blindleistungsart ein Q_{Soll} zu definieren. Q_{Soll} kann ein konstanter Wert oder ein Funktion der Wirkleistung sein. Ist für die Blindleistungsbilanz, wie heute üblich, ein zulässiger Bereich definiert, kann Q_{Soll} einen beliebigen Wert innerhalb diesem einnehmen. Um den minimalen Blindleistungseinsatz zu generieren, werden sinnvollerweise die Ränder des Bereichs verwendet.

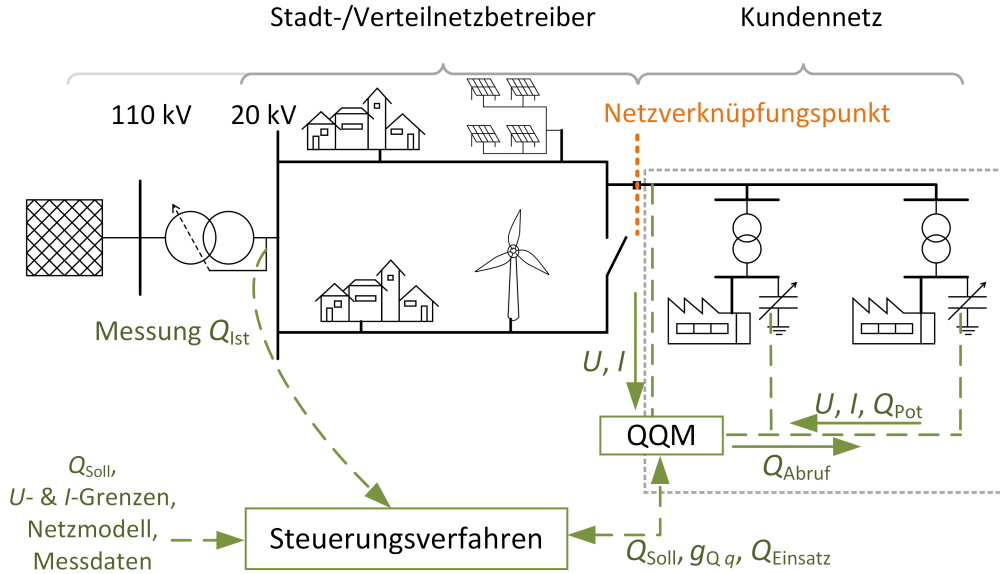


Abbildung 3.1: Schema der dezentralen Blindleistungsregelung mit dezentral verteilten Blindleistungsquellen. Grafik nach [6].

Blindleistungsquellenmanager (QQM), der in folgenden Absätzen näher erläutert wird. Die abzurufende Blindleistung Q_{Abruf} ist der negierte Bedarf, siehe Formel 3.1. In Abhängigkeit des an der Blindleistungsquelle verfügbaren Blindleistungspotenzials kann dann der Bedarf ausgeglichen werden. Zu berücksichtigen sind dabei Netzrestriktionen (Strom- und Spannungsgrenzen).

$$Q_{\text{Abruf}} = -Q_{\text{Bedarf}} = -(Q_{\text{Soll}} - Q_{\text{Ist}}) \quad (3.1)$$

Das Ist-Blindleistungsverhalten der Netzgruppe kann auf Basis lokaler Messgrößen an der Blindleistungsquelle über den QQM prognostiziert oder wie in dieser Arbeit favorisiert, als Messgröße direkt zur Verfügung gestellt werden (siehe Diskussion in Abschnitt 3.5.1). Die aktuellen Strom- und Spannungsverhältnisse im MS-Netz sind „unbekannt“ und werden beim Abruf von Blindleistung netzplanerisch über das Steuerungsverfahren abgesichert. Dieser Grundgedanke ist gegensinnig zu bislang verfolgten wissenschaftlichen/technischen Ansätzen (z. B. [11, 66, 67]), die primär Regelungskonzepte für Anlagen ab der HS/MS-Ebene⁶⁶ verfolgen und somit den aktuellen Istzustand des Netzes über Messungen oder Modelle nachbilden müssen. Dezentral bedeutet im Rahmen dieser Arbeit folglich,

⁶⁶Anlagen der HS/MS-Ebene sind i. d. R. an die Netzleitstelle angebunden. Die HS-Ebene ist zudem mit umfangreicher Messtechnik ausgerüstet, sodass die notwendigen Randbedingungen für Regelungsansätze vorliegen.

dass mehrere in der MS-Ebene verteilte Blindleistungsquellen eingesetzt werden und dabei auf eine flächendeckende messtechnische Netzüberwachung verzichtet wird.

Anhand der Eigentumsgrenzen lässt sich die dezentrale Blindleistungsregelung auf zwei Zuständigkeitsbereiche aufteilen. Diese sind das Kundennetz der Blindleistungsquelle (z. B. Netz eines Industriebetriebs oder Windparks) und das netzbetreibereigene Stromnetz. Letzteres lässt sich weiter in die zentralen Funktionen Netzführung und Netzplanung aufschlüsseln (siehe Abbildung 3.2). Die Kernkomponenten, der QQM und das Steuerungsverfahren, der dezentralen Blindleistungsregelung lassen sich wie folgt zuordnen:

- Der *QQM* koordiniert lokal den Blindleistungsabruf an einer Blindleistungsquelle. Hierzu zählt u. a. die Erfassung von Blindleistungspotenzialen und die Umsetzung bzw. Überwachung eines Blindleistungsabrufs aus dem Kundennetz.
- Das *Steuerungsverfahren* leitet mittels Netzplanungsansätzen die Steuerungsparameter für einen maximal zulässigen Blindleistungsabruf ab. Darüber hinaus stellt es Restriktionen für den Abruf von Blindleistung im Rahmen der Netzführung auf.

Der Fokus dieser Arbeit liegt in der Ausgestaltung des Steuerungsverfahrens und der darin enthaltenen netzplanerischen Absicherung eines Blindleistungsabrufs. Sich daraus ergebende relevante Restriktionen bzw. Umsetzungshinweise für die Netzführung werden in Abschnitt 3.5.1 erläutert. Der QQM wird lediglich qualitativ in Abschnitt 3.1.2 beschrieben, da ein erster Prototyp bereits im Forschungsprojekt SyNErgie [2] parallel zu dieser Arbeit entwickelt wurde.

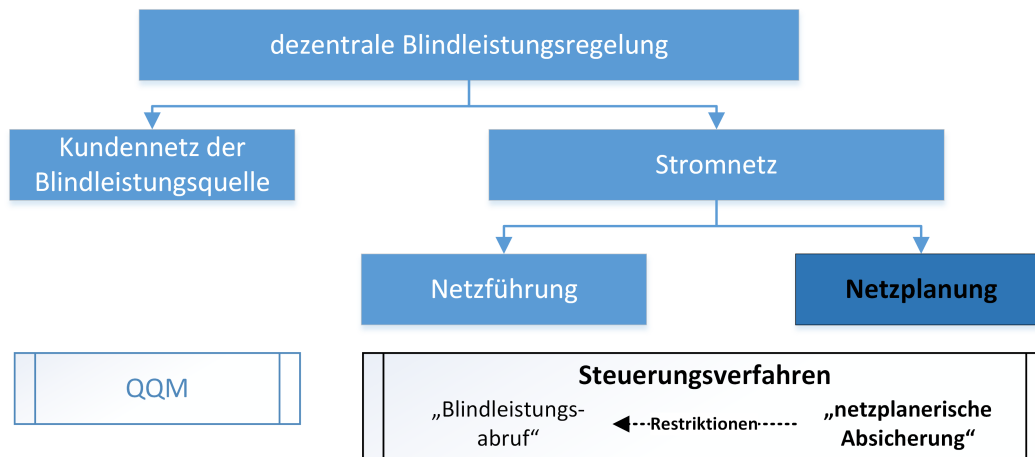


Abbildung 3.2: Einordnung der Kernkomponenten der dezentralen Blindleistungsregelung in Zuständigkeits- und Funktionsbereiche der Blindleistungsquelle und Stromnetzes.

3.1.2 Blindleistungsquellenmanager

Der QQM an der jeweiligen Blindleistungsquelle ist die Schnittstelle zwischen Netzbetreiber und Blindleistungsanbieter. Er stellt die Einhaltung von Strom- und Spannungsrestriktionen innerhalb der Blindleistungsquelle sicher (z. B. im Netz eines Betriebs oder Windparks). Hierbei kann vorhandene Messtechnik⁶⁷ genutzt werden oder es wird analog zum Netzbetreibernetz die später erläuterte Netz-Sensitivitäts- und -Restriktionsanalyse angewendet⁶⁸. Die bereitzustellende Blindleistung kann vom QQM über geeignete Verfahren (siehe z. B. [68]) direkt berechnet oder wie in dieser Arbeit verfolgt, von extern an ihn übergeben werden. Bei Vorhandensein mehrerer Blindleistungseinheiten übernimmt der QQM die Aufteilung des Blindleistungsabrufs innerhalb der Blindleistungsquelle⁶⁹. Bei der Verteilung werden quelleninterne Strom- und Spannungsverhältnisse sowie die aktuellen Blindleistungspotenziale berücksichtigt. Eine weitere wichtige Aufgabe des QQM ist die Dokumentation der eingesetzten und verfügbaren Blindleistung, d. h. der Blindleistungspotenziale. Anhand dieser Werte kann das Steuerungsverfahren durch eine zyklische Anwendung bzw. eine vergrößerte Datenbasis nach-

⁶⁷Messtechnik ist i. d. R. bei größeren Betrieben in Form eines Energiemanagementsystems vorhanden, wie Bestandsaufnahmen bei Betrieben im Rahmen des Forschungsprojektes [2] zeigen.

⁶⁸Erfahrungen aus dem Projekt [2] zeigen, dass aufgrund geringer Netzausdehnungen und redundanter Betriebsmittel im ungestörten Betrieb i. d. R. bei heute üblichen Größen von BKA keine Begrenzungen zu erwarten sind.

⁶⁹Ein erster QQM-Prototyp wurde im Forschungsprojekt [2] entwickelt und getestet. Zur Verteilung des Blindleistungsabrufs wird ein heuristischer Ansatz verwendet.

justiert und die TAB-Anforderungen, wie am Ende des Abschnitts 2.6 andiskutiert, bedarfsorientiert ausgestaltet werden. Grundvoraussetzung für einen stabilen Betrieb ist, dass verschiedene Blindleistungsregelkreise sich nicht gegenseitig anregen, weshalb der QQM idealerweise alle vorhandenen Blindleistungseinheiten, d. h. auch z. B. blindleistungsfähige Wechselrichter von EZA, innerhalb des Kundennetzes regelt.

3.1.3 Beschreibung des Steuerungsverfahrens für Blindleistungsquellen

Das entwickelte Steuerungsverfahren ist in Abbildung 3.3 als Strukturbild dargestellt. Basierend auf den verschiedenen Eingangsdaten (z. B. historische Messdaten, Anlagenparameter und Netzmodell) werden die Steuerungsparameter der Blindleistungsquellen bestimmt. Diese sind u. a. die Gewichtungsfaktoren g_Q zur Verteilung des Blindleistungsabrufs auf mehrere Blindleistungsquellen (detailliertere Informationen werden in den folgenden Abschnitten gegeben). Für jede einzelne Blindleistungsquelle können darüber hinaus z. B. die aus Sicht der Netzrestriktionen maximal zulässige, abrufbare Blindleistung am Anschlusspunkt der Quelle (Q_{\max}), der Einflussbereich des Blindleistungsabrufs⁷⁰ sowie begrenzende Netzbetriebsmittel, an denen Spannungs- und Stromgrenzen den Blindleistungsabruf limitieren, ausgegeben werden. Die Einzelbetrachtung liefert folglich Anhaltspunkte, wo sinnvollerweise neue Blindleistungsquellen zu errichten (Netzbereiche mit geringem Einfluss anderer Quellen) bzw. Netzausbaumaßnahmen im Hinblick auf die Vergrößerung der aktuellen Potenzialausnutzung einer Blindleistungsquelle durchzuführen wären⁷¹.

Das Steuerungsverfahren besteht aus vier Teilprozessen und ist als Ergänzung zur bisherigen Netzplanung zu sehen. Umgesetzt wird es im Rahmen dieser Arbeit als teilautomatisiertes Modell, das das Lastflussberechnungsprogramm PowerFactory der Firma DlgSILENT und die Mathematik-Software MATLAB der Firma MathWorks nutzt.

Die Einhaltung der Netzrestriktionen (Spannungs- und Stromgrenzen) im MS-Netz bei Abruf von Blindleistung wird im Steuerungsverfahren durch ein zwei-

⁷⁰Der Einflussbereich beschreibt den Netzbereich, dessen Netzbetriebsmittel eine relevante Spannungs- und/oder Auslastungsänderung durch einen Blindleistungsabruf erfahren.

⁷¹Beispielsweise können Ortsnetzstationen identifiziert werden, bei denen durch Einsatz von RONT spannungsbedingte Limitierungen aufgehoben und so die maximal abrufbare Blindleistung vergrößert werden kann.

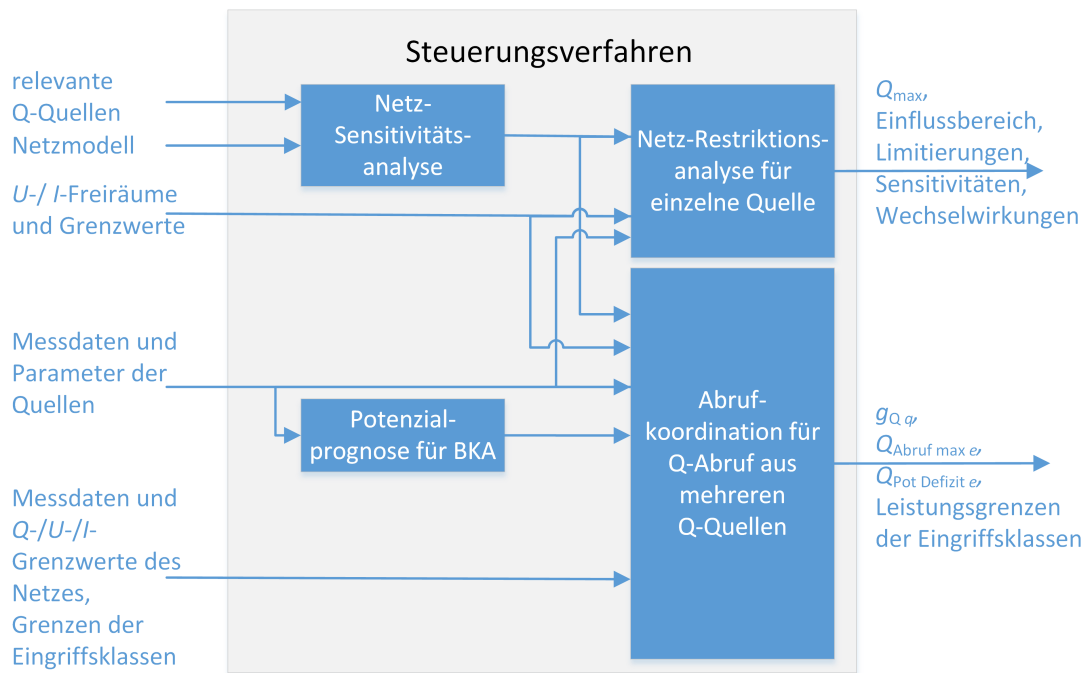


Abbildung 3.3: Darstellung des entwickelten Steuerungsverfahrens als Prozess.

stufiges Verfahren, die **Netz-Sensitivitäts- und -Restriktionsanalyse** sichergestellt (siehe Abschnitt 3.2). Die Netz-Sensitivitätsanalyse ermittelt analytisch auf Basis eines Netzmodells relevante Wechselwirkungen zwischen Spannungshaltung, Betriebsmittelauslastung und Blindleistungsabruf aus einer Blindleistungsquelle. Die bestimmten Systemeigenschaften werden anschließend der Netz-Restriktionsanalyse übergeben, die unter Verwendung von verfügbaren Freiräumen der Spannungshaltung und Betriebsmittelauslastung verschiedene Blindleistungsquellenparameter berechnet. Die Spannungs- und Stromfreiräume können in Anlehnung an die Diskussion in Abschnitt 2.4.5 mittels verschiedener Planungsgrundsätze für die Schnittstelle zur NS- und HS-Ebene bereitgestellt werden. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt auf der Bewertung der Spannungshaltung, da durch die heute noch übliche starre Kopplung von MS- und NS-Ebene deutlich eingeschränkere Freiräume in der MS-Ebene erwartet werden, als dies bei der Betriebsmittelauslastung der Fall ist. Die Netz-Restriktionsanalyse findet sowohl Anwendung bei der Bewertung einer einzelnen Blindleistungsquelle als auch von mehreren (Prozess Abrufkoordination). Die Bewertungsergebnisse für eine Blindleistungsquelle sind die Grenzwerte für einen zulässigen Blindleistungsabruf (Q_{\max}), der Einflussbereich des Blindleistungsabrufs und die identifizierten Netzbetriebsmittel, an denen der Blindleistungsabruf limitiert wird.

Bei dezentralem Einsatz mehrerer Blindleistungsquellen muss der Blindleistungsabruf aufgeteilt werden. Hierzu wird der ermittelte Bedarf skaliert, wodurch die einzelne Blindleistungsquelle nur noch einen prozentualen Anteil beiträgt. Dessen Höhe wird mit Hilfe eines Algorithmus zur **Koordination des Q-Abrufs aus mehreren Quellen** in Form von Gewichtungsfaktoren g_Q bestimmt. Zum Einsatz kommt hierbei die lineare Optimierung, die die Gewichtungsfaktoren für die jeweilige Eingriffsklasse berechnet, siehe Abschnitt 3.3. Eine Eingriffsklasse wird dabei über zwei Wirk- und zwei Blindleistungsgrenzwerte definiert. Die Klassenbildung wird vorgenommen, da sich das Blindleistungspotenzial von Blindleistungsquellen sowie die Strom- und Spannungsfreiräume im Netz zu verschiedenen Arbeitspunkten der Netzgruppe unterscheiden⁷² können und deshalb eine klassenabhängige Definition der Gewichtungsfaktoren für die Aufteilung des Blindleistungsabrufs effizienter ist.

Zur Bewertung der Eignung von Blindleistungsquellen zur Bedarfsdeckung der Blindleistungsbilanz ist es notwendig, ihr Blindleistungspotenzial zu bestimmen. Dies geschieht mittels der Verwendung von vorliegenden Messzeitreihen und technischen Parametern der Blindleistungsquelle (z. B. Wirkleistungseinspeisung und $\cos\varphi$ -Grenzen von EZA). Da dies bei BKA i. d. R. nicht möglich ist, müssen gezielt Messungen angestoßen werden oder eine Prognose durchgeführt werden. Für letztere Variante wird ein entsprechendes Modell (**Potenzialprognose für BKA**) beschrieben und diskutiert, siehe Abschnitt 3.4.

3.2 Entwicklung der Netz-Sensitivitäts- und -Restriktionsanalyse zur Bestimmung der maximal abrufbaren Blindleistung aus einer Blindleistungsquelle

Die Netz-Sensitivitäts- und -Restriktionsanalyse lässt sich in zwei Schritte unterteilen:

⁷²Bei Starklast ist z. B. mit einem niedrigen Spannungsniveau zu rechnen, weshalb ein kapazitiver Blindleistungsabruf i. d. R. unkritisch ist. Ein betragsmäßig gleicher kapazitiver Blindleistungsabruf bei Starkeinspeisung ist höchstwahrscheinlich nicht möglich, da aufgrund der hohen Spannungsniveaus der Blindleistungsabruf begrenzt wird. Eine Berücksichtigung aller Netzarbeitspunkte würde folglich in diesem Beispiel den kapazitiven Blindleistungsabruf bei Starklast unnötig limitieren.

1. Die Netz-Sensitivitätsanalyse bestimmt die normierten Strom- und Spannungsänderung an Knoten- und Kantenelementen des Netzmodells, die durch einen Blindleistungsabruf von einem bestimmten Netzknoten (z. B. NVP einer bestehenden oder geplanten Blindleistungsquelle) entstehen würden.
2. Die Netz-Restriktionsanalyse ermittelt aufbauend auf den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse und einzuhaltenden Strom- und Spannungsgrenzen die maximal abrufbare Blindleistung Q_{\max} von einem bestimmten Netzknoten.

Ergebnis der Netz-Sensitivitäts- und -Restriktionsanalyse ist die aus Netzsicht technisch abrufbare maximale Blindleistung Q_{\max} an einem Netzknoten, die noch unabhängig vom Blindleistungspotenzial der Blindleistungsquelle und vom Blindleistungsbedarf der Netzgruppe ist. Beide Phasen werden im Folgenden näher erläutert und diskutiert. Ziel der Untersuchungen in diesem Abschnitt ist die Schaffung von Grundlagen und Randbedingungen für den in Abschnitt 3.3 entwickelten Algorithmus zur Koordination eines gleichzeitigen Blindleistungsabrufs aus mehreren Blindleistungsquellen.

Die nachfolgenden Aussagen zur Sensitivität beziehen sich auf die Sensitivität der Spannung an einem Knotenelement oder den Leistungsfluss über ein Zweigelement, bezogen auf eine Blindleistungsänderung an einem definierten Netzknoten. Dies gilt auch, wenn vom Gradient gesprochen wird. Folglich wird die „Wirkleistungskomponente“ vernachlässigt, da davon ausgegangen werden kann⁷³, dass ein Blindleistungsabruf einen zu vernachlässigenden Einfluss auf das Wirkleistungsverhalten der Blindleistungsquelle hat.

3.2.1 Entwicklung der Netz-Sensitivitätsanalyse für einen Blindleistungsabruf aus einer Blindleistungsquelle

Bevor auf die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die im Verteilungsnetz relevanten Spannungsebenen (MS-, HS/MS- und HS-Ebene) eingegangen wird, werden zunächst die Grundlagen der Untersuchung und das Vorgehen erläutert. Im Fokus stehen die mathematische Definition der Sensitivität und ihr Verhalten bei verschiedenen Arbeitspunkten.

⁷³Eine mit dem Blindleistungsabruf einhergehende mögliche Wirkleistungsänderung des Arbeitspunktes an der Blindleistungsquelle wird vernachlässigt. Für Kondensatoren in der MS-Ebene betragen die Wirkverluste z. B. ca. 1 bis 10 $\frac{\text{W}}{\text{kVAr}}$, siehe [39].

3.2.1.1 Grundlagen der Sensitivitätsanalyse

Die mathematische Herleitung der Spannungssensitivität ($SeU = \frac{\delta U_{\text{Knoten}}}{\delta Q_{\text{Quelle}}}$) der Knotenelemente und „Strom“- bzw. Leistungssensitivität ($SeP = \frac{\delta P_{\text{Zweig}}}{\delta Q_{\text{Quelle}}}$ und $SeQ = \frac{\delta Q_{\text{Zweig}}}{\delta Q_{\text{Quelle}}}$) der Zweigelemente wird im Anhang A.5 aufgezeigt. Im Folgenden werden die für diese Arbeit wichtigsten Aspekte erläutert.

Spannungssensitivität

Die Spannungssensitivität wird u. a. im Rahmen der stationären Lastflussberechnung benötigt, um die gesuchten Knotenpotenziale und Zweigströme des Netzmodells zu ermitteln. Die Ermittlung erfolgt meist mithilfe des Newton-Raphson-Verfahrens, das das zu lösende nichtlineare Gleichsystem im Arbeitspunkt linearisiert und iterativ löst. Basis der Analyse bildet das Netzmodell, das alle notwendigen Informationen zur Netzstruktur, die zu analysierenden Arbeitspunkte (z. B. einzelne ausgewählte Worst-Case-Szenarien oder Zeitreihen) sowie Berechnungs- und Auswerteroutinen enthält.

Formel 3.2 zeigt das zu lösende Gleichungssystem, das die Spannungsänderung (in Betrag ΔU und Winkel $\Delta \Theta$) in Abhängigkeit einer Wirk-/Blindleistungsänderung (ΔP und ΔQ) an den Knotenelementen beschreibt. Die inverse Jakobi-Matrix \mathbf{J}^{-1} enthält dabei die Empfindlichkeit/Sensitivität der komplexen Knotenspannung \underline{U} des jeweiligen Knotens ($i = 1, \dots, n$) hinsichtlich einer Wirk- bzw. Blindleistungsänderung. Die Hauptdiagonalelemente beschreiben die Spannungssensitivität eines Knotens bezogen auf eine Wirk- bzw. Blindleistungsänderung an ihm selbst, die Nebendiagonalelemente die Spannungssensitivität⁷⁴ eines Knotens hinsichtlich einer Wirk- bzw. Blindleistungsänderung an einem anderen Knoten des Netzes. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Spannungssensitivität eines beliebigen Knotens i verwendet, um die Auswirkung eines Blindleistungsabrufs am Knoten j , dem Anschlusspunkt einer Blindleistungsquelle, zu bewerten und anschließend im Rahmen der Netz-Restriktionsanalyse den maximal zulässigen Blindleistungsabruf zu bestimmen. Analoges gilt für die Leistungsflüsse auf den Zweigelementen.

⁷⁴Im Folgenden wird unter Spannungssensitivität die Sensitivität des Betrags der komplexen Knotenspannung und somit des Spannungseffektivwerts verstanden. Auf die Sensitivität der Phasenlage wird im weiteren nicht näher eingegangen, da diese aufgrund der Strom- und Spannungsgrenzen in der fokussierten MS-Ebene nur eine geringe Bandbreite im zulässigen Arbeitsbereich mit deutlichen Abstand zur Stabilitätsgrenze aufweist (siehe auch „Erläuterungen zur Spannungssensitivität“ in Abschnitt 3.2.1.2).

$$- \mathbf{J}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \Delta P_2 \\ \dots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \dots \\ \Delta Q_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta \Theta_2 \\ \dots \\ \Delta \Theta_n \\ \frac{\Delta U_2}{U_r} \\ \dots \\ \frac{\Delta U_n}{U_r} \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Leistungssensitivität

Die Leistungssensitivität $\frac{\delta Q_{\text{Zweig}}}{\delta Q_{\text{Quelle}}}$ und $\frac{\delta P_{\text{Zweig}}}{\delta Q_{\text{Quelle}}}$ der Zweigelemente lässt sich, wie im Anhang A.5 beschrieben, über die Spannungssensitivität der Zweigenden ableiten und sind in erster Näherung nicht vom Arbeitspunkt abhängig. Sie werden vielmehr durch die Netzstruktur bzw. deren Impedanzen definiert, über die die Lastflussaufteilung im Netz mittels „Stromteilerregel“ bestimmt werden kann. Die Scheinleistungssensitivität $\frac{\delta S_{\text{Zweig}}}{\delta Q_{\text{Quelle}}}$ ist hingegen stark vom Arbeitspunkt abhängig.

In Abschnitt 2.4.3 wird anhand von Abbildung 2.12 gezeigt, dass eine Verdoppelung der Blindleistung bei Arbeitspunkten mit hoher Auslastung und heute typisch vorkommenden $\tan\varphi$ -Verhältnissen zu einer Erhöhung der Scheinleistung um maximal 26 % führt. Eine andere Darstellungsform zeigt Abbildung 3.4. Diese illustriert die auf den Blindleistungsabruf bezogene Scheinleistungsänderung⁷⁵ $\frac{\Delta S}{\Delta Q}$ bei verschiedenen $\tan\varphi$ -Werten (vor bzw. ohne Blindleistungsabruf) und unterschiedlich hohen Blindleistungsabrufen (± 10 % bis ± 1000 %). Mit zunehmendem $\tan\varphi$ dominiert die Blindleistung den Betrag der Scheinleistung, wodurch die Höhe der Scheinleistungsänderung zunimmt und gegen einen Wert von 100 % strebt. Wie im Anhang A.2 untersucht, strebt der $\tan\varphi$ bei heute üblichen hohen Auslastungswerten der Leitungen im Mittel gegen einen Wert von ca. 0,2. Bei einem im Vergleich zur anfänglichen Blindleistung zusätzlich halb so hohen Blindleistungsabruf (Kennlinie „ $\Delta Q = +50$ %“) beträgt die Scheinleistungsänderung ca. 24 % des Blindleistungsabrufs, was in diesem Fall einem Scheinleistungszuwachs von ca. 12 % bezogen auf den ursprünglichen Scheinleistungswert entspricht.

⁷⁵Die Scheinleistungsänderung ΔS beschreibt die durch einen Blindleistungsabruf ΔQ hervorgerufene Änderung der Scheinleistung, bezogen auf die Höhe der abgerufenen Blindleistung.

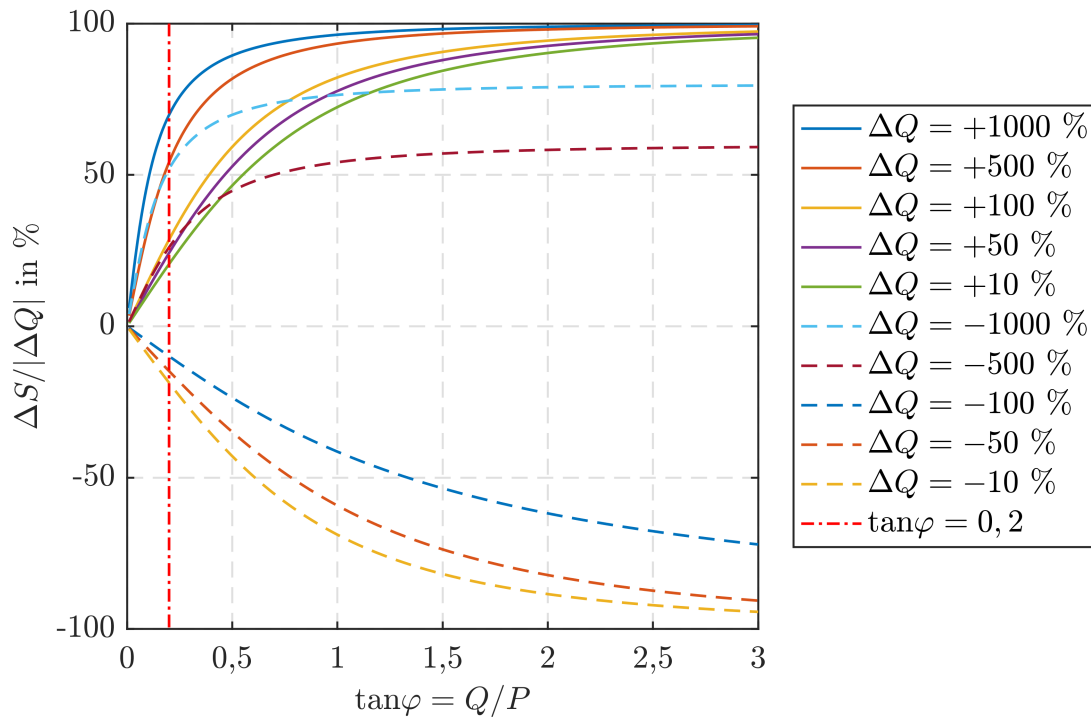


Abbildung 3.4: Darstellung der auf den Blindleistungsabruf normierten Scheinleistungsänderung $\frac{\Delta S}{\Delta Q}$ bei verschiedenen Blindleistungsänderungen ΔQ in Abhängigkeit verschiedener Ausgangs- $\frac{Q}{P}$ -Verhältnisse.

Bislang unberücksichtigt bei dieser Betrachtung sind die Leitungsverluste, die sich durch geänderte Stromflüsse und Spannungsniveaus ergeben. Diese werden näher in den Abschnitten 3.2.1.6 und 3.2.1.7 diskutiert.

Vorzeichennomenklatur

Wichtig für die richtige Interpretation der Sensitivitätswerte ist das korrekte Verständnis der Vorzeichendefinition. In dieser Arbeit wird u. a. das Lastflussberechnungsprogramm PowerFactory verwendet. Eine positive Sensitivität sagt dort aus, dass mit steigender Blindleistung die aktuelle Spannung an einem Knoten bzw. die Wirk- oder die Blindleistung an einem Zweigelement steigt. Mit steigender Blindleistung ist dabei ein kapazitiveres Verhalten der Blindleistungsquelle unterstellt. Dieser Zusammenhang wird später im Rahmen der Netz-Restriktionsanalyse nochmals bei der Bestimmung der maximal induktiven bzw. kapazitiven Blindleistung unter Berücksichtigung der Leistungssensitivität von Zweigelementen aufgegriffen. Die in diesem Abschnitt diskutierten Sensitivitätswerte haben das Vorzeichen des in der Technik üblichen Verbrau-

cherzählpeilsystems, d. h. eine negative Spannungssensitivität sagt aus, dass die Spannung mit zunehmend induktiverem Verhalten sinkt. In Abschnitt 3.3 wird von dieser Festlegung abgewichen, da die Umsetzung des Verfahrens mit PowerFactory erfolgt. An entsprechender Stelle wird nochmals darauf hingewiesen.

3.2.1.2 Modell zur Bewertung der Arbeitspunktabhängigkeit der Sensitivitätswerte

Wie die Herleitung (Formel A.9 und A.10 im Anhang A.5) zeigt, sind die gesuchten Sensitivitätswerte (Elemente von \mathbf{J}^{-1}) von der Netzstruktur (Impedanzwerte) und von den Wirk- und Blindleistungsflüssen, d. h. vom Arbeitspunkt des Netzes abhängig. Die Struktur des Netzes wird im Folgenden als konstant bzw. bekannt angenommen.

Da die ermittelten Sensitivitätswerte Ergebnisse einer Kleinsignaluntersuchung sind, muss geklärt werden, unter welchen Randbedingungen und für welche Größenordnungen eines Blindleistungsabrufs die ermittelten Werte gültig sind, oder ob z. B. Sicherheitsmargen notwendig sind, um eine Unterschätzung des Einflusses eines Blindleistungsabrufs auf die Spannungshaltung bzw. Betriebsmittelauslastung zu vermeiden. Ziel der nachfolgenden Untersuchung ist es, die relevanten Zusammenhänge zu beschreiben, um diese in verallgemeinerter Form im Rahmen der Netz-Restriktionsanalyse bzw. im in Abschnitt 3.3 beschriebenen Algorithmus zu Koordination des Blindleistungsabrufs aus mehreren Blindleistungsquellen nutzen zu können.

Verwendetes Netzmodell

Zur Erläuterung der Wechselwirkungen und Bewertung der Arbeitspunktabhängigkeit wird ein vereinfachtes Netzmodell diskutiert. Das Modell zur Bewertung der Sensitivität besteht aus einem Zweigelement das einen „Slack-Knoten“ mit konstanter Spannung von 1,00 p. u. und festem Phasenwinkel mit einer „Last“ verbindet. Je nach Auswertung symbolisiert das Zweigelement eine HS-Leitung, einen HS/MS-Transformator oder eine MS-Leitung. An der Last wird die Wirk- P und Blindleistung Q von -100 % bis +100 % der Nennscheinleistung S_r des Zweigelements variiert und die Spannungsänderung am Ende der Leitung erfasst.

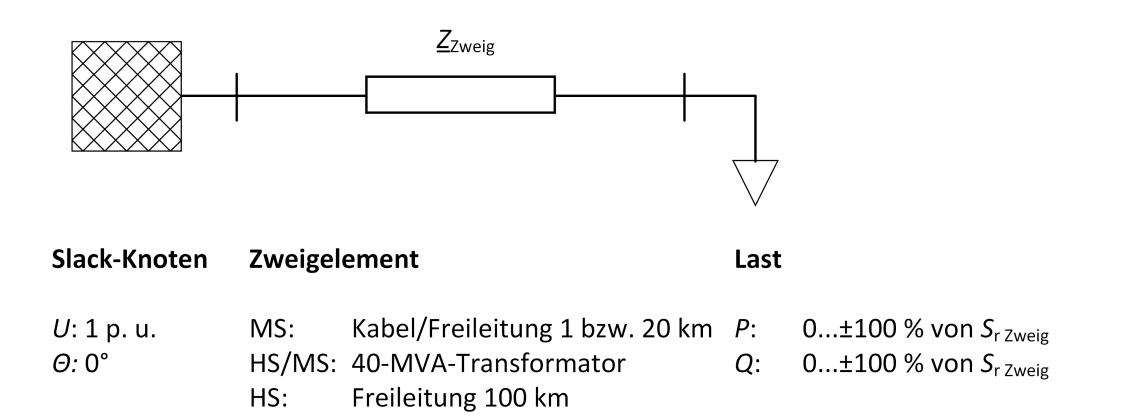


Abbildung 3.5: Vereinfachtes Netzmodell zur Bewertung der Betriebspunktabhängigkeit der Sensitivitätswerte.

Im Rahmen der Auswertungen werden exemplarisch heute übliche Leitungs- und Transformatortypen betrachtet (siehe Tabelle 3.1, die Leitungsparameter sind im Anhang A.6 beschrieben). In den Fällen, in denen das Zweigelement eine Leitung repräsentiert, wird für die MS-Ebene eine Leitungslänge von 1 bzw. 20 km und für die HS-Ebene eine Leitungslänge von 100 km verwendet. Diese Annahmen bilden somit extreme Grenzfälle nach und orientieren sich an der über die Verlustbeurteilung abgeleiteten „Faustformel“: ein kV pro km.

Tabelle 3.1: Verwendete Zweigtypen im vereinfachten Netzmodell

Spannungsebene	Typ
HS	Donaumast mit 2 Systemen Al/St 435/55
HS/MS	40-MVA-Transformator
MS	NA2XSy 3x150 und Einebenenmast mit einem System 94-AL1/15-ST1A

Das verwendete Netzmodell bildet einen Worst-Case-Fall für die Höhe und Betriebspunktabhängigkeit der Sensitivitäten ab, da eine maximale Zweigimpedanz (gewählte Leitungslängen) in Kombination mit einer hohen Zweigauslastung (Abbildung einer Punktlast und keiner Streckenlast) gegeben ist. Dieses Modell wurde bewusst so gewählt, um maximal mögliche Abhängigkeiten erfassen und beschreiben zu können sowie diese in geeigneter Weise (normiert) auf reale Verhältnisse als Sicherheitsmargen im Rahmen des entwickelten Steuerungsverfahrens projizieren zu können (siehe Abschnitt 3.2.2.1 Absatz „Einfluss der Arbeitspunktabhängigkeit der Sensitivitätswerte“).

Erläuterung der Auswertediagramme

Zur Bewertung der Betriebspunktabhängigkeit der Sensitivitätswerte werden Diagramme mit Darstellung des Spannungsbetrags eines Knotens bzw. der Wirk-/Blindverluste eines Zweigelementes oder deren Gradienten erstellt. Durch Auswertung verschiedener Wirk- und Blindleistungsarbeitspunkte der Last im Modell (P und Q werden von -100 % bis +100 % von $S_{r \text{ Zweig}}$ variiert) entstehen Spannungs- bzw. Verlustflächen, die über Äquipotenziallinien angedeutet werden⁷⁶, siehe z. B. Abbildung 3.6. Die resultierenden Flächen erstrecken sich nicht zwangsläufig über alle möglichen Wirk-Blindleistungsarbeitspunkte, da nicht konvergente Arbeitspunkte verworfen und zusätzlich Spannungs- und Auslastungsgrenzen optional berücksichtigt werden. Als Spannungsgrenzen werden im Folgenden zwei Varianten betrachtet. Die Grenzwerte stellen zum einen ein extremes Szenario dar, bei dem das zulässige Spannungsband ± 10 % der vereinbarten Versorgungsspannung⁷⁷ U_c beträgt. Zum anderen wird ein typischer Auslegungsfall mit einem maximalen Spannungsfall von 5 % und einer maximalen Spannungsanhebung von 2 % untersucht. Arbeitspunkte, die alle aufgestellten Randbedingungen (Konvergenz, Einhaltung von Strom- und Spannungsgrenzen) erfüllen, charakterisieren den zulässigen Arbeitsbereich eines Zweigelements. Weitere optionale Bestandteile der Grafiken sind:

- Kennzeichnung von Arbeitspunkten (rote Kreise) mit reinem Wirk- oder Blindleistungsverhalten, bei denen die gewählten Spannungs- und/oder Auslastungsgrenzen des Zweigelements verletzt werden (siehe auch Anhang A.6),
- Andeutung (rot gestrichelte Linien) eines heute typischen Wirk-Blindleistungsverhaltens (siehe auch Anhang A.4)

⁷⁶In den folgenden Diskussionen wird davon ausgegangen, dass die Blindleistung auf der Abszisse und die Wirkleistung an der Ordinate aufgetragen ist.

⁷⁷In den folgenden Untersuchungen werden 20 kV bzw. 110 kV als vereinbarte Versorgungsspannung verwendet.

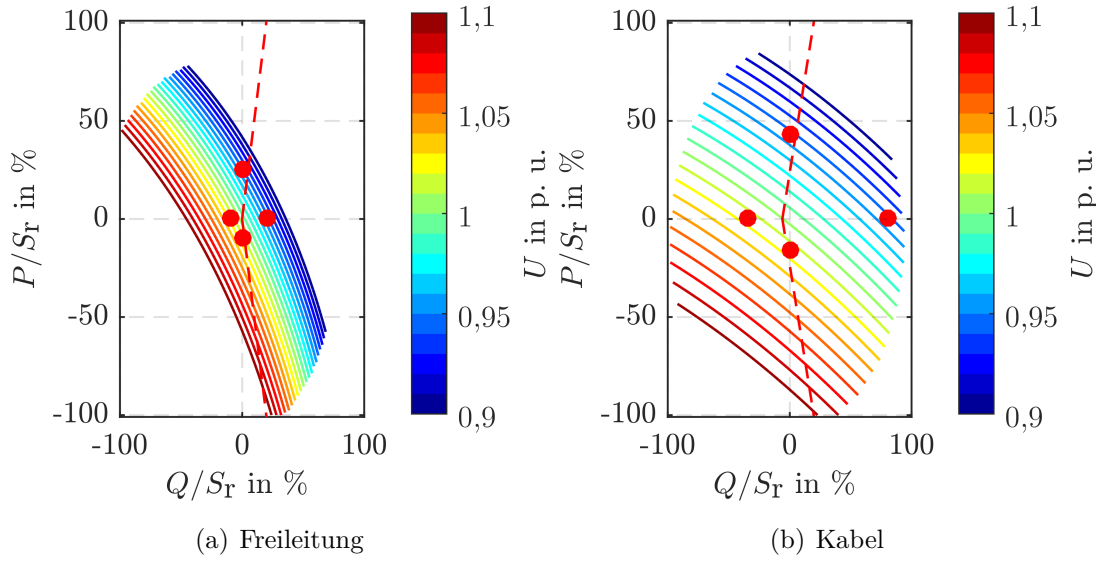


Abbildung 3.6: Äquipotenziallinien des Spannungsniveaus am Ende der Leitung bei verschiedenen Arbeitspunkten und Limitierung der Arbeitspunkte auf einen Bereich zwischen 0,90 p. u. und 1,10 p. u. Die roten Punkte zeigen die ermittelten maximal anschließbaren Wirk- bzw. Blindleistungswerte bei Spannungsgrenzen $U_c + 2\%$ / -5% . Die gestrichelten roten Linien deuten ein heute typisches Blindleistungsverhalten an.

In Analogie zur elektrischen Feldstärke sind Sensitivitätswerte dort hoch, wo die Äquipotenziallinien eng beieinander liegen (siehe Abbildung 3.7 mittig). Variiert die Dichte (d. h. der Abstand) der Linien, so ist eine Arbeitspunktabhängigkeit der jeweiligen Sensitivität vorhanden. Die Sensitivität $\frac{\delta U}{\delta P}$ bzw. $\frac{\delta U}{\delta Q}$ entspricht der Steigung der Fläche in Richtung der Wirk- bzw. Blindleistungsachse am jeweiligen Arbeitspunkt. Der Weg der höchsten Spannungssensitivität verläuft orthogonal zu den Äquipotenziallinien und kann mathematisch über den Gradienten (Formel 3.3) ausgedrückt werden. Analoges gilt für $\frac{\delta P}{\delta Q}$ bzw. $\frac{\delta Q}{\delta P}$.

$$\text{grad}(U(Q, P)) = \begin{pmatrix} \frac{\delta U(Q, P)}{\delta Q} \\ \frac{\delta U(Q, P)}{\delta P} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Je vertikaler die Tangente zur Äquipotenziallinie am jeweiligen Arbeitspunkt verläuft, desto ausgeprägter dominiert die Blindleistungssensitivität die Richtung des Gradienten (bei einer vertikalen Tangente verläuft der Gradient parallel zu Blindleistungsachse (siehe Abbildung 3.7 links)). Ändert sich die Lage des Gradienten

entlang einer Äquipotenziallinie (Abbildung 3.7 rechts) und/oder variieren die Abstände der Äquipotenziallinien (Abbildung 3.7 mittig), so ist auch die Spannungssensitivität vom Arbeitspunkt abhängig.

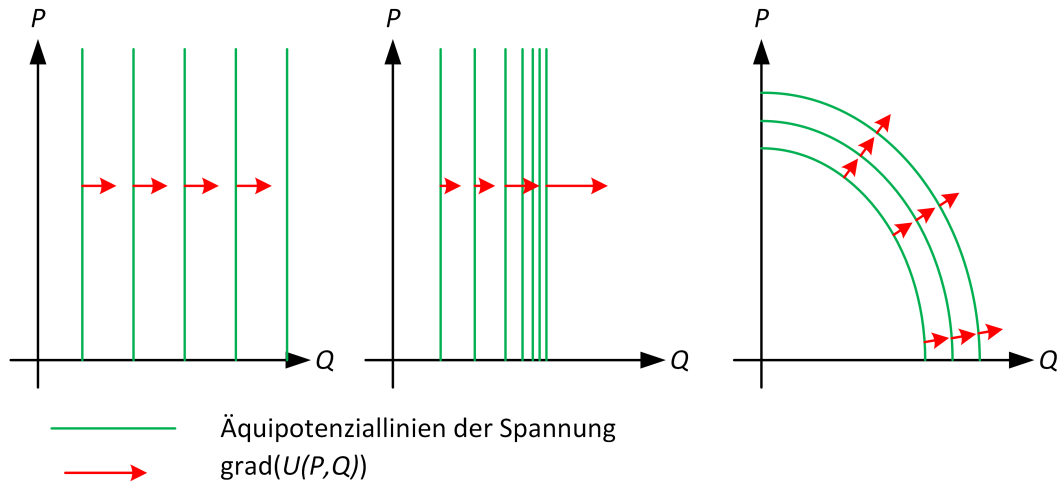


Abbildung 3.7: Interpretation der Spannungssensitivität $\frac{\delta U}{\delta Q}$ anhand der Äquipotenziallinien des Spannungsniveaus (grüne Linien) am Ende einer Leitung bei verschiedenen Arbeitspunkten. Über die rot eingezeichneten Pfeile wird der Verlauf und die Höhe des Gradienten angedeutet.

Erläuterung der Spannungssensitivität

Der Blindleistungsfluss über ein Zweigelement beeinflusst sowohl den Betrag als auch die Phasenlage der Spannung am Ende der Leitung. Die Höhe des Einflusses ist abhängig von Vorzeichen und Betrag der Wirk- und Blindleistung sowie der Impedanz des Zweigelements. Abbildung 3.8 zeigt das Spannungsniveau am Ende der 20 km langen Freileitung bei einem konstanten Wirkleistungsbezug von 10 % der Nennscheinleistung der Leitung in Abhängigkeit verschiedener Blindleistungsarbeitspunkte (Datenauszug aus Abbildung 3.12). Der graue Zeiger beschreibt das konstant angenommene Spannungsniveau in Höhe von 1,0 p. u. am Anfang der Leitung. Der grüne Zeiger zeigt die komplexe Spannung am Ende der Leitung und 0 MVar Blindleistungsbezug. Bei kapazitivem Bezug würde sich die Spannung am Leitungsende nach rechts entlang der blauen Linie bewegen und sich dabei erhöhen (Zeigerlänge nimmt zu). Bei induktivem Bezug der Last würde sich die Spannung nach links entlang der orangenen Linie bewegen (Zeigerlänge nimmt ab). Die rosa Kreuze kennzeichnen ein zulässiges Spannungsband von $\pm 10\%$ und die grünen ein zulässiges Spannungsband von $+2\%$ und -5% .

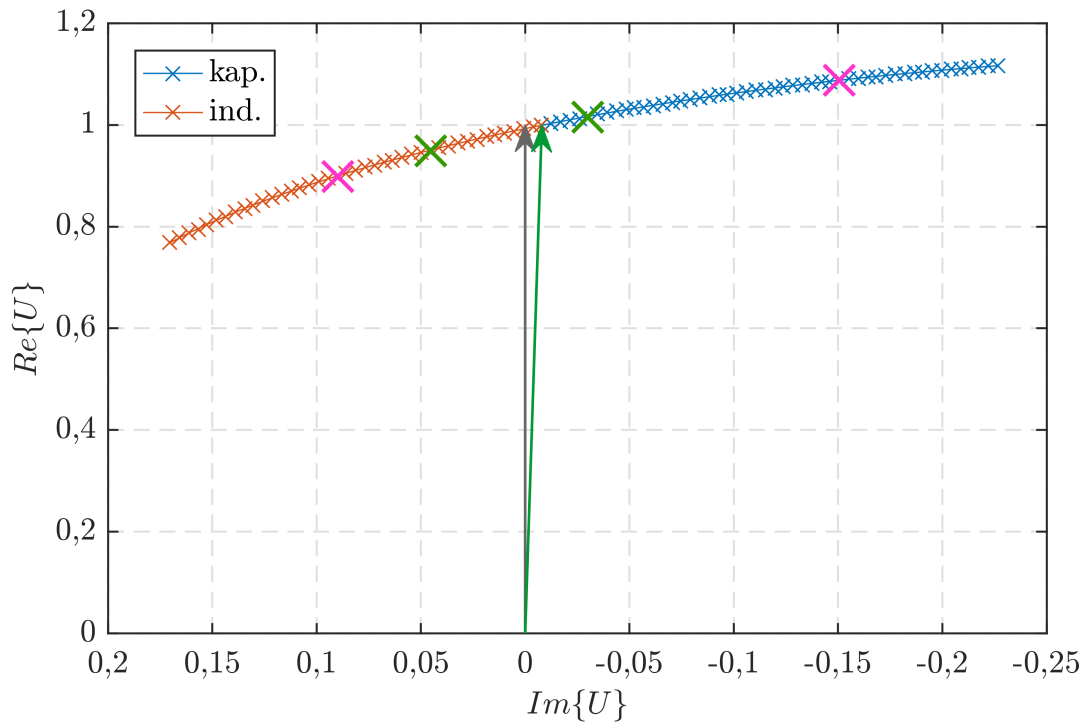


Abbildung 3.8: Spannungsverlauf („Bogenstück“) am Ende einer 20 km langen Freileitung bei einem konstantem Wirkleistungsbezug von 10 % der Nennscheinleistung der Leitung in Abhängigkeit verschiedener Blindleistungsarbeitspunkte. Der graue Zeiger repräsentiert die fest vorgegebene Spannung am Anfang der Leitung. Der grüne Zeiger zeigt die Spannung am Ende der Leitung für einen exemplarischen Arbeitspunkt. Die Kreuze kennzeichnen verschiedene Spannungsgrenzen.

Führt man den induktiven bzw. kapazitiven Blindleistungsabruf gedanklich fort (aufgrund der Konvergenz in der Simulation bzw. unzulässig hohen Phasendrehung in der Realität nicht möglich), ergäbe sich als Spannungs-kennlinie eine „Spirale“. In Richtung des induktiven Bezugs der Last würde sich die Spirale immer enger winden und die Spannung immer weiter abnehmen. In kapazitiver Richtung würde die Spannung hingegen steigen und die „Spirale“ sich aufweiten. Anhand dieser bildlichen Interpretation wird klar, dass aufgrund von Krümmung und Radius der „Spirale“ die Sensitivität des Spannungsbetrags (Zeigerlänge) bei induktiverem Verhalten stetig zunimmt bzw. mit kapazitiverem Verhalten stetig abnimmt. Auch der Einfluss der Zweigimpedanz lässt sich hiermit anschaulich erklären. Je höher die Impedanz ist, desto größer ist der Abstand zwischen den Zeigerspitzen und damit der Einfluss auf die Spannungshaltung. Das $\frac{X}{R}$ -Verhältnis beeinflusst dabei die Form der „Spirale“ bzw. deren Krüm-

mung, was je nach Arbeitspunkt einen stärkeren oder schwächeren Einfluss hervorruft.

Die zunehmende Spannungssensitivität bei steigendem induktiven Verhalten soll abschließend anhand des komplexen Spannungsfalls $\Delta \underline{u}$ entlang einer Leitung und bei Betrachtung eines vereinfachten Leitungsmodells (nur Längszweig⁷⁸) mathematisch diskutiert werden. Der komplexe Spannungsfall ergibt sich aus dem Produkt der Leitungsimpedanz \underline{Z} und dem Leitungsstrom \underline{I} und ist für einen induktiven Blindstrom I_b in Formel 3.4a beschrieben. Der komplexe Spannungsfall lässt sich in einen Real- und Imaginärteil aufspalten, den Längs- u_{lf} ⁷⁹ und den Querspannungsfall u_{qf} .

$$\Delta \underline{u} = \underline{u}_{LA} - \underline{u}_{LE} = \underline{Z} \cdot \underline{I} \approx (R + jX) \cdot (I_w - jI_b) \quad (3.4a)$$

$$u_{lf} = \operatorname{Re}\{\underline{Z} \cdot \underline{I}\} \approx I \cdot (R \cdot \cos\varphi_{LE} + X \cdot \sin\varphi_{LE}) \quad (3.4b)$$

$$u_{qf} = \operatorname{Im}\{\underline{Z} \cdot \underline{I}\} \approx I \cdot (X \cdot \cos\varphi_{LE} - R \cdot \sin\varphi_{LE}) \quad (3.4c)$$

Bei reinem Blindleistungsfluss (Wirkstrom $I_w = I \cdot \cos\varphi_{LE} = 0$) und unter Berücksichtigung des Wertebereichs des Phasenverschiebungswinkels φ_{LE} am Ende der Leitung⁸⁰, unterscheidet sich der resultierende Spannungsfall bei betragsmäßig gleich großem induktiven bzw. kapazitiven Blindstrom lediglich im Vorzeichen des Längs- und Querspannungsfalls. Die Spannungsänderung, d. h. die Sensitivität, ist in beiden Fällen betragsmäßig gleich. Um die Zunahme der Spannungssensitivität nachvollziehen zu können, muss beachtet werden, dass in der Auswertung Leistungs- und keine Stromwerte betrachtet werden. Dies hat zur Folge, dass bei betragsmäßig gleicher Blindleistung unterschiedlich hohe Zweigströme fließen. Bei induktiven Verhalten der Last im Modell sinkt die Spannung am Ende der Leitung ab, weshalb ein höherer Strom fließt als bei betragsmäßig gleichem

⁷⁸Bei der Berechnung der Daten wird ein π -Modell der Leitung verwendet, d. h. der Einfluss der Leitungsverluste wird nicht, wie es z. B. bei der Bewertung des Ferranti-Effekts notwendig ist, über differentiell kleine Leitungselemente, sondern über konzentrierte Ersatzschaltbildelemente nachgebildet. Folglich wirkt sich nur der halbe Betrag der Suszeptanz und Konduktanz der Leitung, die am Leitungsende abgebildet werden, auf den Leistungsfluss im Längszweig aus (diese bestimmen auch das Verhalten bei „leerlaufender“ Leitung).

⁷⁹Der Längsspannungsfall wird im Verteilungsnetz aufgrund des i. d. R. geringen Verdrehwinkels der Spannung am Anfang \underline{u}_{LA} und Ende \underline{u}_{LE} der Leitung, oft vereinfacht als Näherung für den wirklichen Spannungsfall verwendet, der die Änderung des Spannungseffektivwerts beschreibt.

⁸⁰Der Wertebereich liegt zwischen -90° und $+90^\circ$ bei induktiven bzw. kapazitiven Verhalten.

kapazitiven Verhalten. Die Höhe des Blindstroms ergibt sich aus dem Quotienten der Blindleistung und der Spannung am Leitungsende. Bei zunehmenden induktiven Verhalten nimmt der Betrag der Blindleistung zu und die Spannung ab, weshalb der Betrag des Stroms und somit der Spannungsfall größer werden. Im kapazitiven Fall hingegen nimmt der Quotient ab, da sich die Spannung erhöht.

Normierung der Betriebspunktabhängigkeit der Sensitivitätswerte

Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, inwieweit Blindleistung bei konstanter Wirkleistung aus einer Blindleistungsquelle abgerufen werden kann. Bildlich wird dies in Abbildung 3.9 dargestellt. Ausgangspunkt ist der Punkt A mit heute typischem Blindleistungsverhalten (rot gestrichelte Linie). Dieser befindet sich innerhalb des zulässigen Arbeitsbereichs (grün eingerahmte Fläche). Ein Blindleistungsabruf bei konstanter Wirkleistung ist gleichzusetzen mit einer horizontalen Verschiebung des Punktes A entlang der blau gestrichelten Linie. Die maximal abrufbare induktive Blindleistung wird am Punkt C bzw. die kapazitive am Punkt D erreicht. Der Punkt B stellt einen von vielen möglichen dazwischenliegenden neuen Arbeitspunkten dar. Da das in Abschnitt 3.3 beschriebene Verfahren zum Abruf von Blindleistung anhand der Sensitivitätswerte, der Freiräume im Spannungsband und der Freiräume der Betriebsmittelauslastung den zulässigen Blindleistungsabruf bestimmt, ist u. a. zu untersuchen, inwieweit sich die Sensitivitätswerte in Abhängigkeit des Blindleistungsabrufs ändern, um eine mögliche Unterschätzung des Einflusses auf die Spannungshaltung und Betriebsmittelauslastung zu vermeiden.

Um verschiedene Leitungstypen miteinander vergleichen zu können, werden der Wert der Wirk- und Blindleistung auf die Bemessungsleistung des Zweigelements normiert und in % von S_r ausgedrückt⁸¹. Für die Sensitivität ergibt sich somit die Einheit von p. u. pro einem Prozent Blindleistungsabruf.

Zur Bewertung der Betriebspunktabhängigkeit der Spannungssensitivität, wird ihre Änderung zwischen den Punkten D und C ausgewertet. Dies erfolgt in diskreter Schrittweite⁸² für verschiedene Wirkleistungswerte im Bereich zwischen -100% bis $+100\%$ von $S_{r \text{ Zweig}}$. Um die Betriebspunktabhängigkeit verallgemeinern und zwischen den betrachteten Leitungstypen vergleichen zu können, wird bei konstanter Wirkleistung P der Betrag der Sensitivitätsänderung zwischen den Punk-

⁸¹Wirk- und Blindleistung sind somit in MW pro MVA bzw. MVA_r pro MVA angegeben.

⁸²Die Klassenbreite beträgt 2% von $S_{r \text{ Zweig}}$.

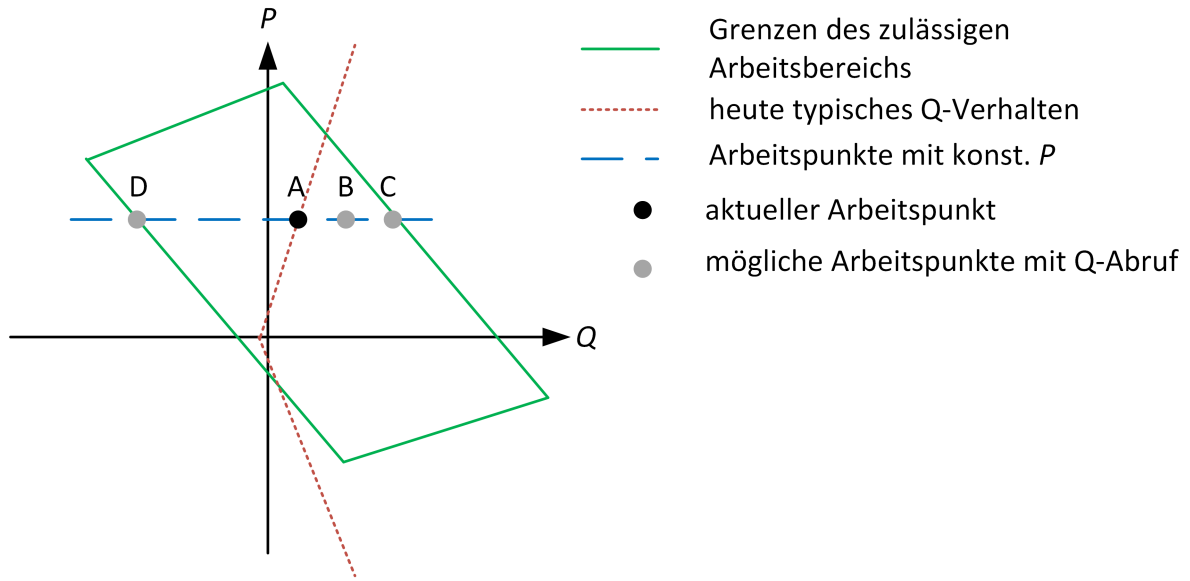


Abbildung 3.9: Erläuterungsgrafik zur Bestimmung der Arbeitspunktabhängigkeit der Sensitivitätswerte bzw. deren Korrekturfaktoren.

ten C und D in % der maximal auftretenden Spannungssensitivität⁸³ an Punkt D bestimmt (Zähler in Formel 3.5) und anhand der Breite des Blindleistungsarbeitsbereichs (Nenner Formel 3.5) je MVar normiert. Die resultierenden Werte beschreiben die Beträge der prozentualen Änderung der Sensitivität je MVar Blindleistungsabruf.

$$\frac{\Delta SeU_{DC \text{ rel}}}{\Delta Q} = \frac{\left| \frac{\frac{\delta U_D}{\delta Q} - \frac{\delta U_C}{\delta Q}}{\frac{\delta U_D}{\delta Q}} \right| \cdot 100}{(Q_C - Q_D)} \quad (3.5)$$

Ein exemplarisches Ergebnis für verschiedene Randbedingungen (Leitungstyp, Spannungsgrenzen und Ausgangsblindleistungsverhalten), das in einem späteren Abschnitt genauer diskutiert wird, zeigt Abbildung 3.10. Die dort dargestellten Kennlinien erlauben eine Abschätzung der maximalen Sensitivitätsänderung. Sie beschreiben den Worst-Case-Fall, bei dem der Ausgangspunkt A am linken Rand des zulässigen Arbeitsbereichs, also deckungsgleich mit Punkt D ist.

⁸³Die Lage der minimalen und maximalen Sensitivitätswerte wird an dieser Stelle vorweg genommen und in den folgenden Abschnitten erläutert. Grundsätzlich ergeben sich aufgrund der gewählten Vorzeichendefinition durchwegs negative Werte, deren Betrag mit zunehmenden induktiven Verhalten steigt.

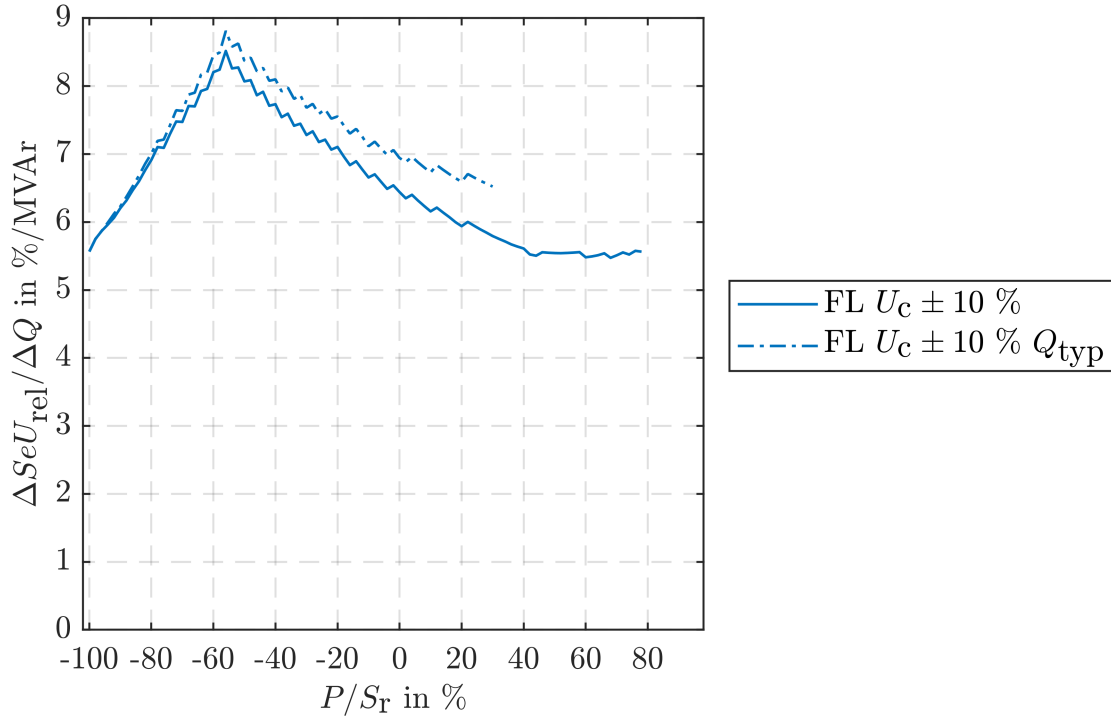


Abbildung 3.10: Maximal mögliche Änderung der Spannungssensitivität je MVar bei konstantem P in der MS-Ebene für verschiedene Leitungstypen, Spannungsgrenzen und Blindleistungsbezugswerten.

Berücksichtigt man ein heute typisches Blindleistungsverhalten (rot gestrichelte Linien in Abbildung 3.9) bei der Definition des Ausgangspunktes A und den Anspruch, dass eine Unterschätzung der Sensitivität vermieden werden soll⁸⁴, so kann der auszuwertende Blindleistungsarbeitsbereich und somit die resultierende Betriebspunktabhängigkeit weiter eingeschränkt werden. Der verbleibende relevante Auswertebereich je Wirkleistungsarbeitspunkt wird über den Punkt A (liegt auf roter Linie) und den Punkt C (liegt auf rechtem Rand des zulässigen Arbeitsbereichs) definiert. Die entsprechend angepasste Normierung zeigt Formel 3.6. Die dazugehörigen Ergebnisse sind in den Diagrammen mit dem Zusatz „ Q_{typ} “ versehen.

$$\frac{\Delta SeU_{AC \text{ rel}}}{\Delta Q} = \frac{\left| \frac{\frac{\delta U_A}{\delta Q} - \frac{\delta U_C}{\delta Q}}{\frac{\delta U_A}{\delta Q}} \right| \cdot 100}{(Q_C - Q_A)} \quad (3.6)$$

⁸⁴Werte der Spannungssensitivität steigen mit zunehmender induktiver Blindleistung im zulässigen Arbeitsbereich, was in späteren Abschnitten gezeigt wird.

3.2.1.3 Analyse der Spannungssensitivität der MS-Ebene

Abbildung 3.11 zeigt die numerisch ermittelten Ergebnisse für die MS-Freileitung und das MS-Kabel bei einer Leitungslänge von 1 km und Leitungsauslastungen⁸⁵ kleiner oder gleich 100 %. Der sehr geradlinige Verlauf und gleichmäßige Abstand der Äquipotenziallinien drückt aus, dass die Spannungssensitivität als nahezu konstant über alle Arbeitspunkte angenommen werden kann. Vergrößert man die Leitungslänge, verändern sich die Verhältnisse aufgrund der gestiegenen Impedanz. Hierbei wird auch der Einfluss unterschiedlicher $\frac{X}{R}$ -Verhältnisse deutlich, was im Folgenden anhand einer Leitungslänge von 20 km diskutiert wird.

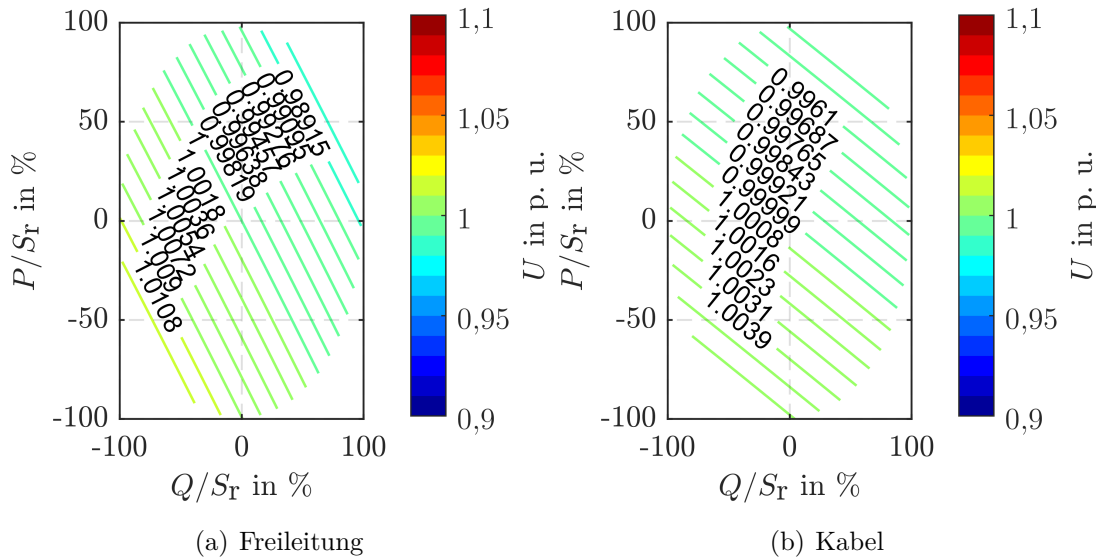


Abbildung 3.11: Äquipotenziallinien des Spannungsniveaus am Ende der MS-Freileitung ($\frac{X}{R} = 1,20$) und des MS-Kabels ($\frac{X}{R} = 0,49$) mit 1 km Leitungslänge bei verschiedenen Arbeitspunkten innerhalb der Grenzen $U_c \pm 10$ % sowie einer Leitungsauslastung kleiner oder gleich 100 %.

Die resultierenden Verhältnisse für die Freileitung bei einer Leitungslänge von 20 km und Leitungsauslastungen kleiner oder gleich 100 % sind in Abbildung 3.12 dargestellt. Im I. Quadranten sind zudem nicht konvergente Arbeitspunkte enthalten („weißer Bereich“), bei denen die Spannung auf unzulässig kleine Werte

⁸⁵Die Leitungsauslastung ergibt sich über $\frac{I_{\text{Zweig}}}{I_r \text{ Zweig}}$. Aufgrund dieser Definition gibt es gültige Arbeitspunkte mit z. B. $P = -100 \% \cdot S_r$ und zeitgleich $Q \neq 0$, da sich S_r über die Nennwerte von Spannung und Strom berechnet, jedoch die Arbeitspunkte eine höhere Spannung als U_r aufweisen können.

absinkt und die numerische Berechnung abbricht. Hinsichtlich der Arbeitspunkt/-abhängigkeit der Spannungssensitivität sind zwei Effekte zu beobachten. Ausgehend vom Arbeitspunkt mit maximaler Wirkleistungsrückspeisung und maximalen kapazitivem Verhalten ($P = -100 \%$, $Q = -100 \%$) verringert sich der Abstand der Äquipotenziallinien bei Durchschreiten des Arbeitsbereichs in jeder beliebigen Richtung, was mit einem Anstieg der Spannungssensitivität gleichzusetzen ist. Gleichzeitig nimmt die Krümmung der Äquipotenziallinien ausgehend vom III. Quadranten entlang der 1. Winkelhalbierenden zu, was wiederum eine steigende Spannungssensitivität ausdrückt. Die in Abbildung A.6 im Anhang A.6 dargestellten Ergebnisse für das Kabel zeigen hingegen ein „gutmütiges“ Verhalten. Der Abstand der Äquipotenziallinien ist sehr homogen und die Linien weisen nur eine geringe Krümmung auf, was auf konstantere $\frac{\delta U}{\delta Q}$ -Werte bzw. auf eine geringere Abhängigkeit vom Arbeitspunkt hinweist.

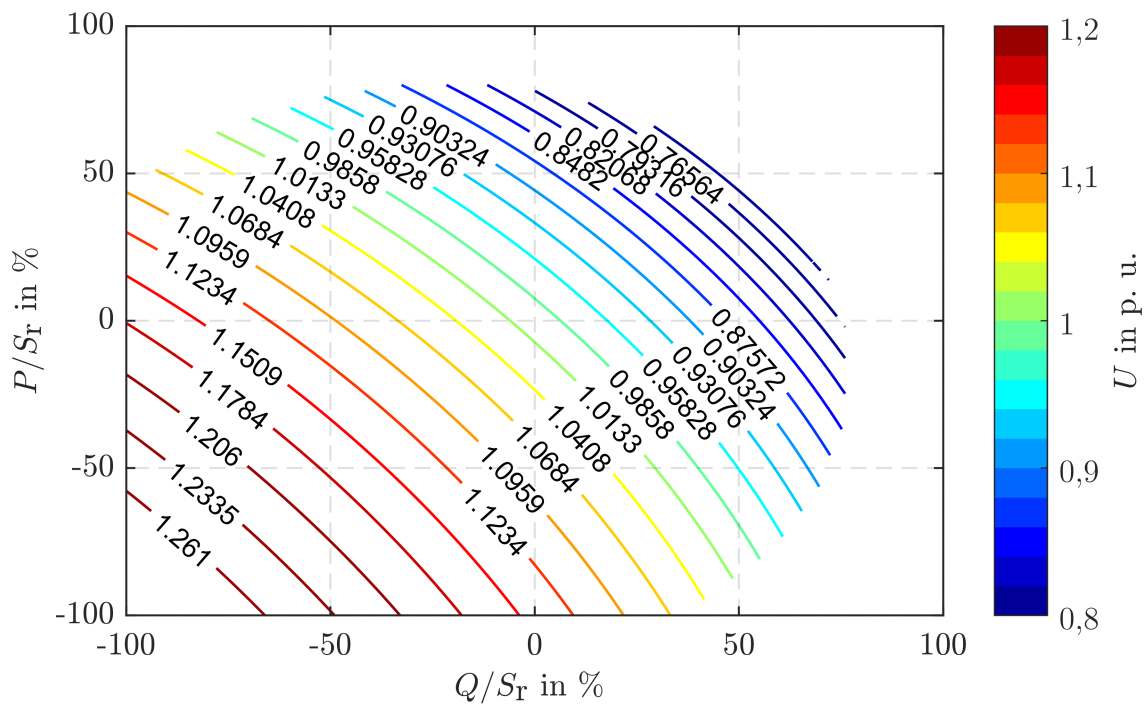


Abbildung 3.12: Äquipotenziallinien des Spannungsniveaus am Ende der Freileitung ($\frac{X}{R} = 1, 20$) mit 20 km Leitungslänge bei verschiedenen Arbeitspunkten innerhalb der Grenzen $U_c \pm 10 \%$ sowie einer Leitungsauslastung kleiner oder gleich 100 %.

Die für die Analyse relevanten Arbeitspunkte der Leitung können durch Berücksichtigung von Spannungsgrenzwerten (zusätzlich zur bislang definierten Bedingung, dass die Leitungsauslastungen kleiner oder gleich 100 % sein muss) weiter limitiert werden. Die verbleibenden Arbeitspunkte spannen den zulässigen Ar-

beitsbereich der Leitung auf. In diesem muss sich letztendlich auch ein Blindleistungsabruf bewegen.

In Abbildung 3.13 sind nun nur noch Äquipotenziallinien der Spannung im zulässigen Arbeitsbereich aufgetragen, d. h. bei Spannungswerten zwischen 0,90 p. u. und 1,10 p. u. sowie Leitungsauslastungen kleiner oder gleich 100 %. Im Vergleich zu Abbildung 3.12 zeigt sich eine deutlich homogenere Aufteilung der Äquipotenziallinien. Würde man die maximal zulässige Auslastung reduzieren, würden sich die Ränder des zulässigen Arbeitsbereichs in Richtung des Koordinatenursprungs bewegen und sich somit die zulässigen Arbeitspunkte verringern. Die Freileitung verhält sich sensitiver als das Kabel, was durch die weiterhin gekrümmten Äquipotenziallinien der Spannung und die unterschiedlichen Linienabstände ausgedrückt wird. Die roten Kreise kennzeichnen die maximalen Wirk- bzw. Blindleistungsarbeitspunkte für eine Leitungslänge von 20 km bei typischen Spannungsbandgrenzen ($U_c + 2 \text{ \%} / -5 \text{ \%}$), die über eine Auswertung (Abbildung A.5 im Anhang A.6) ermittelt wurden. Die gestrichelte Linie markiert ein für heutige Verhältnisse typisches Blindleistungsverhalten, das bei Leerlauf der Ladeleistung der Leitung (wird in Abschnitt 3.2.1.6 näher beschrieben) entspricht und mit steigender Auslastung schnell gegen einen $\tan\varphi$ von 0,2 strebt (siehe Anhang A.4).

Der Betrag der Spannungssensitivität $|\frac{\delta U}{\delta Q}|$ der betrachteten Leitungen nimmt vereinfacht ausgedrückt mit steigender (d. h. induktiver) Blindleistung stetig zu, siehe Abbildung 3.14 für die Freileitung bzw. Abbildung A.7 im Anhang A.6 für das Kabel. Die auftretenden Extrema bei der Freileitung und einem zulässigen Arbeitsbereich mit einer vereinbarte Versorgungsspannung $U_c \pm 10 \text{ \%}$ liegen bei ca. $-0,0035 \frac{\text{p. u.}}{\text{\%}}$ ⁸⁶ bis ca. $-0,0015 \frac{\text{p. u.}}{\text{\%}}$. Beim Kabel erstreckt sich die Sensitivität von $-0,0004 \frac{\text{p. u.}}{\text{\%}}$ bis $-0,0008 \frac{\text{p. u.}}{\text{\%}}$. Die auf die Leitungsnennscheinleistung S_r normierten Sensitivitätswerte können durch Multiplikation mit $(\frac{S_r}{100})^{-1}$ in $\frac{\text{p. u.}}{\text{MVA}_r}$ umgerechnet werden. Der maximale Betrag der Sensitivität der Freileitung ergibt sich somit zu $0,029 \frac{\text{p. u.}}{\text{MVA}_r}$ bzw. des Kabels zu $0,008 \frac{\text{p. u.}}{\text{MVA}_r}$. Die eingezeichneten schwarzen Strichpunktlinien werden am Ende dieses Abschnitts aufgegriffen.

⁸⁶Kenngrößen mit der Einheit $\frac{\text{p. u.}}{\text{\%}}$ geben die Spannungsänderung in p. u. an einem Knotenelement in Abhängigkeit der abgerufenen Blindleistung an. Letztere wird dabei in Prozent der Nennscheinleistung (siehe Tabelle A.6 im Anhang A.6) der betrachteten Leitung ausgedrückt.

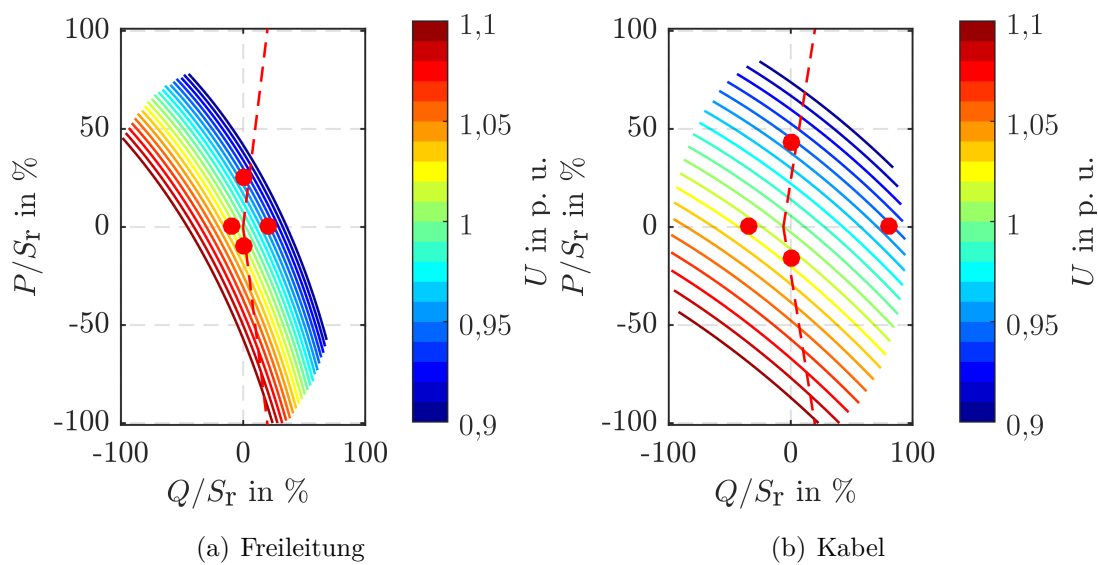


Abbildung 3.13: Äquipotenziallinien des Spannungsniveaus am Ende der Leitung (mit 20 km Leitungslänge) bei verschiedenen Arbeitspunkten und Limitierung der Arbeitspunkte auf einen Bereich zwischen 0,90 p. u. und 1,10 p. u. Die roten Punkte zeigen die ermittelten maximal anschließbaren Wirk- bzw. Blindleistungswerte bei Spannungsgrenzen $U_c + 2 \%$ / $- 5 \%$. Die gestrichelten roten Linien deuten ein heute typisches Blindleistungsverhalten an.

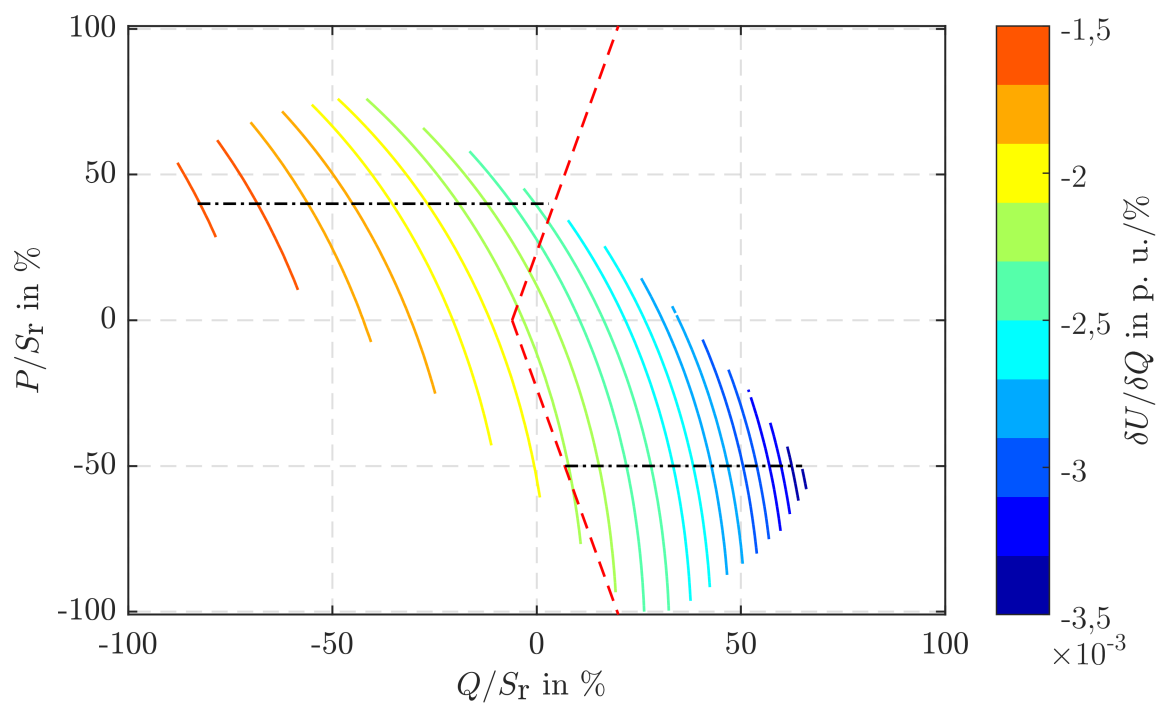


Abbildung 3.14: Spannungssensitivität der Freileitung in Abhängigkeit des Blindleistungsarbeitspunktes bei Arbeitspunkten innerhalb der Grenzen $U_c \pm 10$ % sowie einer Leitungsauslastung kleiner oder gleich 100 %.

An dieser Stelle kann festgehalten werden, dass die Spannungssensitivität $\frac{\delta U}{\delta Q}$ nicht als konstant angenommen werden kann und somit eine Abhängigkeit vom Arbeitspunkt vorliegt. Das zu entwickelnde Steuerungsverfahren für Blindleistungsquellen verfolgt allerdings das Ziel, an Arbeitspunkten mit konstantem Wirkleistungswert zusätzliche Blindleistung einzusetzen. Somit ist nicht die Streuung der Sensitivitätswerte $\frac{\delta U}{\delta Q}$ über den kompletten zulässigen Arbeitsbereich, sondern entlang eines konstanten Wirkleistungsarbeitspunktes („horizontaler Schnitt“ in Auswertediagrammen, siehe Erläuterung in Abschnitt 3.2.1.2) von Interesse. Für einen kapazitiven Blindleistungsabruf kann aufgrund des Verlaufs der Äquipotenziallinien bereits festgehalten werden, dass die an einem Arbeitspunkt ermittelte Sensitivität den betragsmäßigen Maximalwert darstellt und ein zusätzlicher kapazitiver Blindleistungsabruf den Betrag der Sensitivität reduziert. Ein induktiver Blindleistungsabruf erhöht betragsmäßig die Sensitivität, weshalb hier eine genauere Abschätzung der Arbeitspunktabhängigkeit von Nöten ist. Im Folgenden wird auf den Zusatz „betragsmäßig“ verzichtet. Eine „hohe Sensitivität“ ist somit mit betragsmäßig großen Sensitivitätswerten gleichzusetzen.

Der Verlauf der Spannungssensitivität $\frac{\delta U}{\delta Q}$ und des Spannungsniveaus U sind exemplarisch für die Freileitung bei P gleich -50 % von S_r in Abbildung 3.15 zu sehen. $|\frac{\delta U}{\delta Q}|$ nimmt mit steigender Blindleistung zu. Der Spannungsverlauf fällt nahezu linear mit steigender Blindleistung. Würde man ausgehend von einem Arbeitspunkt mit z. B. Q gleich 20 % von S_r zusätzlich induktive Blindleistung abrufen, würde der Einfluss auf die Spannungshaltung bei Verwendung von $\frac{\delta U}{\delta Q}(Q = 20 \%)$ dennoch unterschätzt werden, analog würde ein kapazitiver Abruf überschätzt werden⁸⁷.

Die Sensitivitätsänderung in Abhängigkeit des Blindleistungsabrufs kann, wie in Abschnitt 3.2.1.2 erläutert, für verschiedene Wirkleistungsarbeitspunkte (Klassenbreite beträgt 2 % von S_r des Zweigelements) bestimmt und normiert in $\frac{\%}{\text{MVA}_r}$ ⁸⁸ ausgedrückt werden. Abbildung 3.16 zeigt die entsprechenden Ergebnisse⁸⁹. Erwartungsgemäß liegen die Werte der Freileitung aufgrund der höheren Impedanz und des höheren $\frac{X}{R}$ -Verhältnisses über denen des Kabels. Weiter führt ein zu-

⁸⁷Bezogen auf einen maximalen Blindleistungsabruf bis zu den Blindleistungsarbeitspunktgrenzen von -6 % und 66 % ergibt sich eine maximale Unterschätzung von ca. 50 % bzw. Überschätzung von ca. 14 % bezogen auf die Sensitivität am Arbeitspunkt mit $Q = 20 \%$.

⁸⁸Die Einheit $\frac{\%}{\text{MVA}_r}$ beschreibt die prozentuale Änderung der Sensitivität je MVA_r abgerufener Blindleistung.

⁸⁹Der nicht auf den Blindleistungsarbeitsbereich normierte Verlauf der Sensitivitätsänderung, d. h. die prozentuale Änderung der Sensitivität, wird in Abbildung A.8 im Anhang A.6 gezeigt.

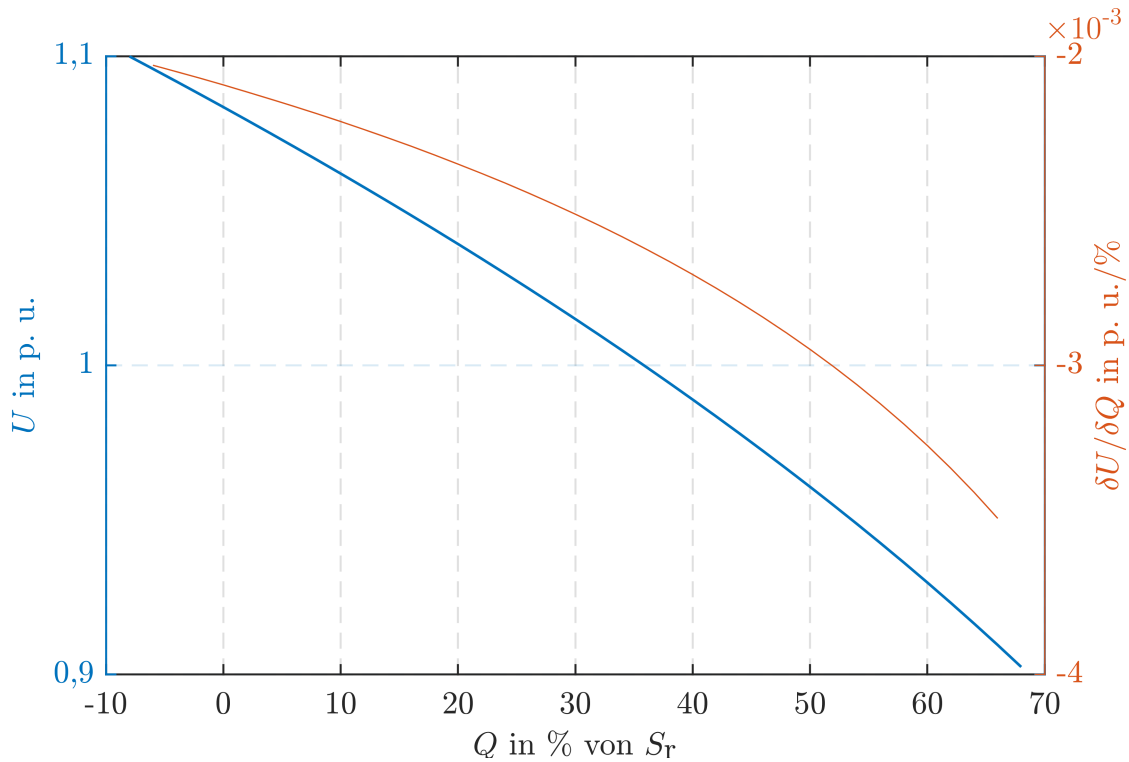


Abbildung 3.15: Verlauf der Spannung und der Spannungssensitivität entlang der Blindleistungsachse bei konstantem $P = -50 \%$ an der Freileitung mit einer Leitungslänge von 20 km und den Spannungsgrenzen $U_c \pm 10 \%$ sowie einer Leitungsauslastung kleiner oder gleich 100 %.

lässiger Arbeitsbereich der Spannung von $U_c \pm 10 \%$ zu höheren Änderungen je MVar als ein heute typischer Bereich von $U_c + 2 \%$ / -5% . Dies liegt an einem deutlich größeren Arbeitsbereich im P - Q -Diagramm und damit verbundenen höheren auftretenden Sensitivitätswerten (vgl. Abbildung 3.13). Die Spitzen bzw. Knicke im Kennlinienverlauf ergeben sich aufgrund der „Trapezform“ des zulässigen Arbeitsbereiches. Im mittleren Bereich des „Trapezes“ (entlang der Wirkleistungsachse) variiert die Breite des Blindleistungsarbeitsbereichs bei konstantem Wirkleistungsarbeitspunkt kaum, wodurch die Sensitivitätsänderung je MVar maßgeblich über die Änderung der Spannungssensitivität bestimmt wird. An den Rändern des Wirkleistungsarbeitsbereichs ändert sich zusätzlich die Breite des Blindleistungsarbeitsbereichs, die zusätzlichen Einfluss ausübt. Betrachtet man z. B. Abbildung 3.14, so zeigt sich, dass im IV. Quadranten bei P gleich -60% ein schneller Anstieg der Sensitivität in Kombination mit einem kleinen zulässigen Blindleistungsarbeitsbereich auftritt, wodurch eine hohe Sensitivitätsänderung je MVar bei der Freileitung resultiert.

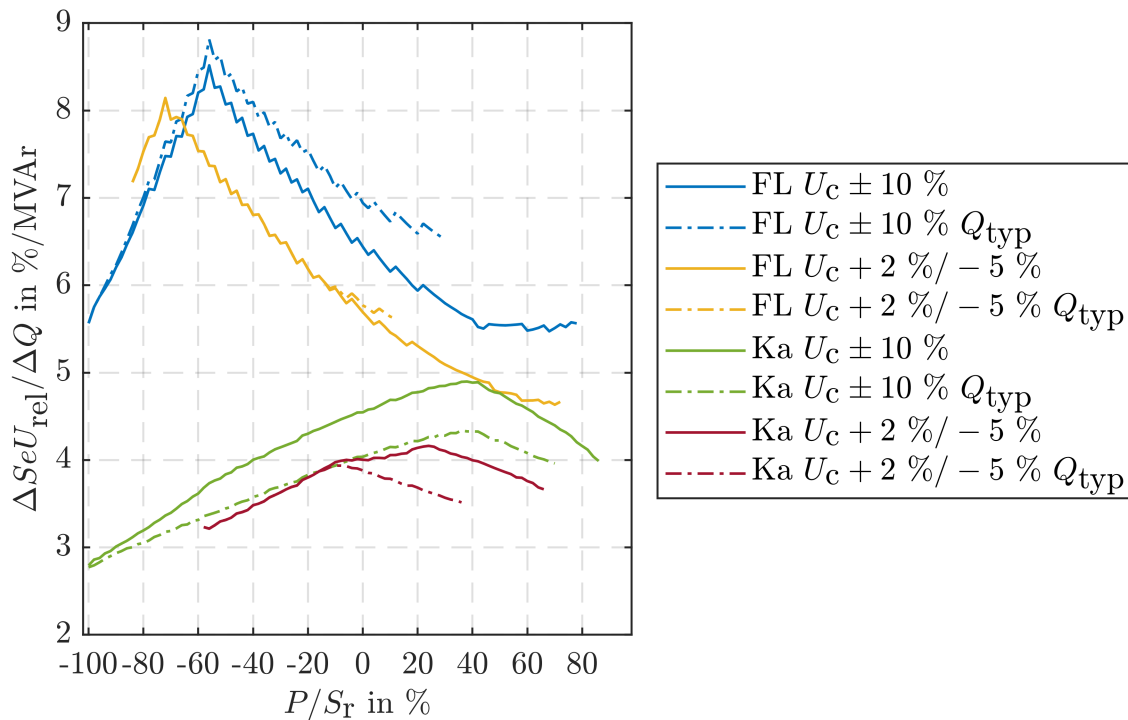


Abbildung 3.16: Maximal mögliche Änderung der Spannungssensitivität je MVar bei konstantem P in der MS-Ebene für verschiedene Leitungstypen, Spannungsgrenzen und Blindleistungsbezugswerten.

Berücksichtigt man ein heute typisches Blindleistungsverhalten (rot gestrichelte Linien in Abbildung 3.13 bzw. gestrichelte Linien in Abbildung 3.16), so kann der auszuwertende Blindleistungsarbeitsbereich und somit die resultierende Sensitivitätsänderung je MVar abgerufener Blindleistung weiter eingeschränkt werden. Die Verläufe des jeweiligen Szenarios mit eingeschränktem zulässigen Blindleistungsarbeitsbereich sind als Strichpunktlinie in Abbildung 3.16 dargestellt. Je nach Lage des Arbeitsbereichs und Verlauf der Spannungssensitivität innerhalb diesem, ergeben sich unterschiedliche Einflüsse auf die Form der Kennlinien. Wo sich der linke Rand des Arbeitsbereichs mit typischen Blindleistungsarbeitspunkten deckt oder nur gering unterscheidet, ergibt sich keine oder nur eine vernachlässigbare Wertänderung. Beim Kabel wird durch die Berücksichtigung typischer Blindleistungsarbeitspunkte der auszuwertende Arbeitsbereich und damit die erfasste Spannweite der Spannungssensitivität deutlich eingeschränkt, was zu einer Reduzierung der Sensitivitätsänderung je MVar Blindleistungsabruf führt. Bei der Freileitung hingegen kommt es bei einem zulässigen Spannungsband von $U_c \pm 10 \%$ zu einem Anstieg der Werte, da in Analogie zu den „Spitzen“ und „Knicken“ das Verhältnis zwischen Breite des Blindleistungsarbeitsbereichs und

Höhe der Sensitivitätsänderung entscheidenden Einfluss hat. Durch die Abbildung typischer Blindleistungsarbeitspunkte wertet man tendenziell einen (induktiven) Arbeitsbereich aus, indem sich die Sensitivitätswerte stark in Abhängigkeit der Blindleistung ändern. Gleichzeitig erfolgt die Normierung auf einen reduzierten Blindleistungsarbeitsbereich, was in Folge zu höheren Änderungswerten je MVar führt. Im Extremfall erhöht sich bei induktivem Blindleistungsabruf die berechnete Spannungssensitivität um ca. $9 \frac{\%}{\text{MVar}}$ bei der Freileitung bzw. $5 \frac{\%}{\text{MVar}}$ beim Kabel. Ausgehend von heute typischen Blindleistungsarbeitspunkten ändert sich die Sensitivität bei kapazitiven Blindleistungsabrufen nur geringfügig.

Zwischenfazit

Die durchgeführte Untersuchung zeigt, dass der Wert der Spannungssensitivität $\frac{\delta U}{\delta Q}$ sich mit zunehmender Leitungslänge und bei konstanter Wirkleistung immer stärker mit dem Arbeitspunkt ändert. Je breiter die Spannungsgrenzen sind, desto größer ist die maximal mögliche Änderung $\frac{\Delta S e U_{\text{rel}}}{\Delta Q}$, die sich zwischen zwei Arbeitspunkten ergeben kann. Anhand eines Modells (siehe Abschnitt 3.2.1.2) wurden die maximal möglichen relativen Sensitivitätsänderungen zwischen zwei Arbeitspunkten bei verschiedenen Spannungsbandgrenzen abgeschätzt. Die Arbeitspunktabhängigkeit der Spannungssensitivität muss folglich bei der Bestimmung der maximal abrufbaren Blindleistung berücksichtigt werden. Ausgehend von einem heute typischen Blindleistungsverhalten (rote Linien in Abbildung 3.14) und aufgrund der „extremen“ Randbedingungen des Modells können die ermittelten Werte von ca. $9 \frac{\%}{\text{MVar}}$ bei der Freileitung bzw. ca. $5 \frac{\%}{\text{MVar}}$ beim Kabel in guter Näherung als maximale „Sicherheitsmarge“ zur Bestimmung der maximal abrufbaren induktiven Blindleistung verwendet werden⁹⁰.

Weiter kann bei kapazitiven Blindleistungsabrufen und ausgehend von heute typischen Ausgangsarbeitspunkten (rote Linien in Abbildung 3.14) zur Bestimmung der maximal abrufbaren kapazitiven Blindleistung direkt der am Ausgangsarbeitspunkt berechnete Sensitivitätswert verwendet werden, da die Spannungssensitivität bei kapazitiven Blindleistungsabrufen nur geringfügig abnimmt. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 3.14 zwei schwarze Strichpunktlinien eingezeichnet. Die obere zeigt für einen kapazitiven Blindleistungsabruf den Bereich der maximalen Sensitivitätsänderung, die untere den bei induktiven Blindleistungsabruf. Berechnet man die Differenz der Sensitivitätswerte zwischen Anfangs-

⁹⁰Besteht ein MS-Strang aus verschiedenen Leitungstypen, sollte der höhere der beiden Werte verwendet werden

und Endpunkt der Linien und normiert diesen auf den Blindleistungsarbeitsbereich, so stellt man fest, dass die Sensitivitätsänderung je MVar beim kapazitiven Blindleistungsabruf (ca. $0,0008 \frac{\text{p. u.}}{\text{MVar}}$) nur halb so groß ist wie die beim induktiven (ca. $0,0016 \frac{\text{p. u.}}{\text{MVar}}$). Die Auswertung der HS/MS-Ebene im nächsten Abschnitt zeigt die analogen Zusammenhänge, warum dort nicht mehr separat darauf eingegangen wird.

3.2.1.4 Analyse der Spannungssensitivität der HS/MS-Ebene

Zur Bewertung eines möglichen Blindleistungsabrufs ist es aus Sicht der Spannungshaltung notwendig, die Impedanz und die Stufenschalterregelung des HS/MS-Transformators zu berücksichtigen. Die Impedanz des Transformators kann in guter Näherung als Induktivität betrachtet werden, weshalb aufgrund der Ergebnisse der Freileitung (besitzt wie ein Transformator eine dominante Reaktanz) eine nicht zu vernachlässigende Spannungssensitivität zu erwarten ist. Weist die verbleibende Netzimpedanz (MS-Leitungen) in Richtung Blindleistungsquelle kleine Werte auf (z. B. aufgrund geschlossener MS-Ringe) limitiert ggf. die Sensitivität des HS/MS-Transformators den Blindleistungsabruf im Zuge der Netz-Restriktionsanalyse. Zu beachten ist die Stufenschalterregelung, die unter Umständen zusätzliche Spannungsfreiräume ermöglicht. Beispielhafte Stufenschalterparameter sind ± 9 Stufen mit einer Stufenspannung von 1,7 % der Nennspannung U_r . Der Stellbereich des Transformators bei dieser Konfiguration entspricht $\pm 15,3$ % von U_r . Eine aktive Stufenschalterregelung hält das Spannungsniveau an der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators innerhalb eines Regelbandes um einen definierten Spannungssollwert konstant. Der Einfluss auf die Spannung durch einen Blindleistungsabruf wird somit für die MS-Ebene gedämpft, da einem Teil der durch einen kapazitiven Abruf resultierenden Spannungsanhebung (an der Impedanz des HS/MS-Transformator und der HS-Ebene) durch eine Erhöhung des Übersetzungsverhältnisses des Stufenschalters entgegengewirkt wird (induktiver Abruf analog). Abbildung 3.17 zeigt eine beispielhafte Häufigkeitsverteilung des Spannungsniveaus an der 110-kV-Seite des HS/MS-Transformators von Beispielnetz Stadt_Zentrum. Zur Einhaltung des Regelbandes wird der mögliche Stellbereich nur zum Teil genutzt. Der Stellbereich des Stufenschalters reicht sowohl über den unteren Spannungsgrenzwert von 96 kV bzw. ca. 0,87 p. u., als auch über die obere Spannungsgrenze von 123 kV nach Norm [69] bzw. ca. 1,12 p. u. hinaus. Der rechts der oberen Spannungsbandgrenze liegende Stellbereich in Höhe von ca. 0,035 p. u. (zwischen ca. 1,12 p. u. $\leq U \leq 1,15$ p. u.) wäre

zwar aus technischer Sicht des Stufenschalters noch ausregelbar und so für einen kapazitiven Blindleistungsabruf nutzbar, jedoch ist nicht nur das Spannungsniveau an diesem HS/MS-Knoten zu beachten, sondern auch das dadurch beeinflusste Spannungsniveau an andern HS-Knoten, die u. U. vertraglichen Regelungen mit HS-Kunden unterliegt. Sind keine vertraglichen Restriktionen vorhanden und besitzen alle relevanten HS/MS-Transformatoren einen ausreichend großen Stellbereich, so wäre ein Blindleistungsabruf bis zur Stellbereichsgrenze erst durch Anpassung der Schutzeinstellungen im Netz möglich.

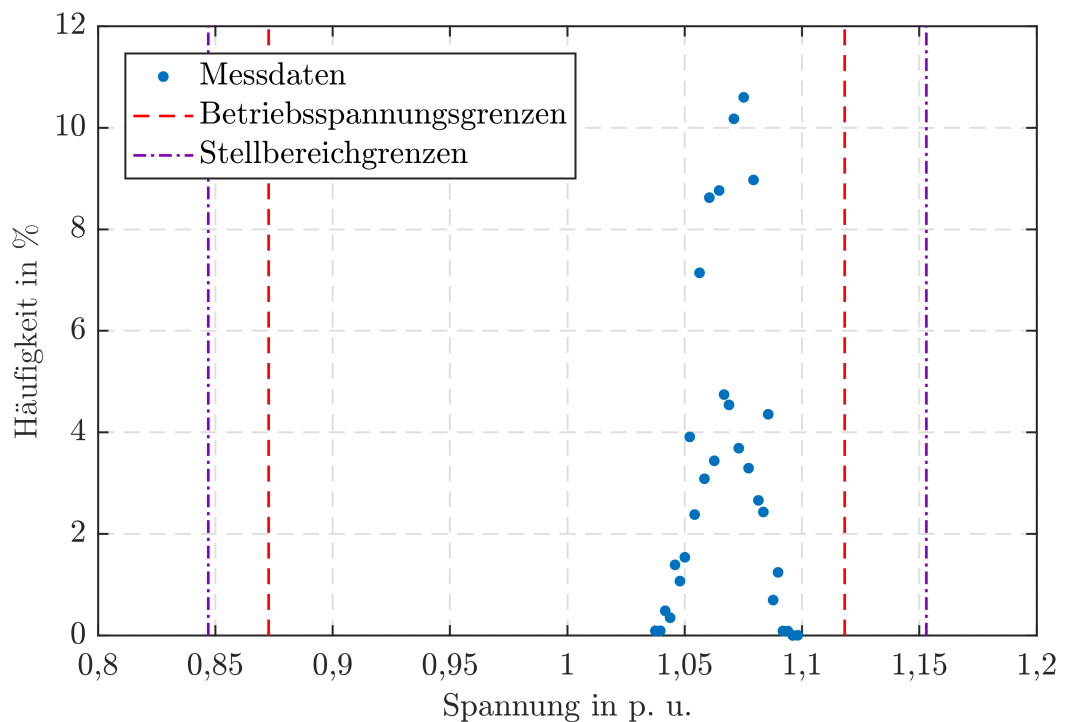


Abbildung 3.17: Häufigkeit von 15-Minuten-Mittelwerten der 110-kV-Spannung eines Jahres von Beispielnetz Stadt_Zentrum auf Basis der Netzleitsystemmessung des zuständigen Netzbetreibers. Die Klassenbreite beträgt ca. 0,0025 p. u.

Eine analog zu den MS-Leitungen durchgeführte Auswertung der Arbeitspunktabhängigkeit der Spannungssensitivität an einem 40-MVA-Transformator⁹¹ zeigt Abbildung 3.18. Die relative Sensitivitätsänderung bei konstanter Wirkleistung und variablem Blindleistungsabruf beträgt je nach Arbeitspunkt bis zu ca. 80 %. Bei Annahme von heute typischen Blindleistungsarbeitspunkten reduziert sich der maximale Sensitivitätsänderung auf ca. 45 % bei Arbeitspunkten im Bereich um P gleich 0 %, siehe blau gestrichelte Linie. Die relative Sensitivitätsänderung je

⁹¹Transformatorparameter: $u_k = 15,72$ %, $P_{Cu} = 146$ kW, $P_{Fe} = 12,9$ kW und $i_0 = 0,035$ %

MVAr Blindleistungsabruf beträgt maximal $1,3 \frac{\%}{\text{MVAr}}$. Die Sensitivitätswerte der Impedanz des HS/MS-Transformators liegen wie beim Kabel in der Größenordnung von $10^{-3} \frac{\text{p.u.}}{\%}$ bzw. $10^{-3} \frac{\text{p.u.}}{\text{MVAr}}$. Die Spannungssensitivität ist im Vergleich zur Freileitung (mit einer Leitungslänge von 20 km) deshalb nicht so hoch ausgeprägt, da die Impedanz des Transformators deutlich geringer ausfällt (ca. $1,5 \Omega$ beim Transformator und ca. 9Ω bei der Freileitung) und zudem der Querspannungsfall aufgrund des sehr hohen $\frac{X}{R}$ -Verhältnisses ($\frac{X}{R} = 43$) am Transformator deutlicher dominiert als bei der Freileitung mit einem $\frac{X}{R}$ -Verhältnis von ca. 1,2. Weitere Darstellungen zum zulässigen Arbeitsbereich, zu Spannungsverläufen und zu Sensitivitätswerten sind dem Anhang A.7 beigelegt.

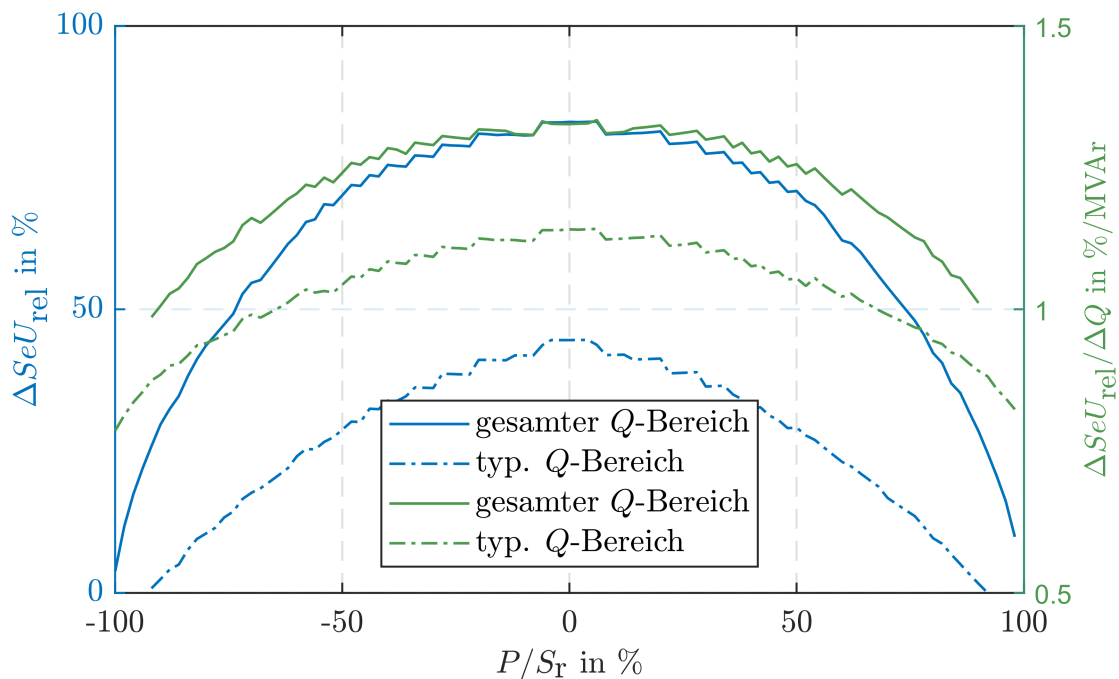


Abbildung 3.18: Maximal mögliche Änderung der Spannungssensitivität am HS/MS-Transformator in % der minimalen Sensitivität bei konstantem P und normiert auf den Blindleistungsabruf in % je MVAr. Die Strichpunktlinien zeigen die Änderung der Spannungssensitivität bei Berücksichtigung eines heute typischen Blindleistungsverhaltens.

3.2.1.5 Analyse der Spannungssensitivität der HS-Ebene

Abbildung 3.19 zeigt eine Auswertung der Kurzschlussimpedanzwerte von ca. 4.000 HS/MS-Knoten. Ausgangsbasis für die Untersuchung ist das in der BMWi-

Studie [9] entwickelte HS-Netzmodell, das keine Kompensationselemente enthält. Deutlich zu erkennen ist, dass die Reaktanz X_k die Kurzschlussimpedanz Z_k bestimmt. 99 % der R_k -Werte liegen unter ca. 7Ω und X_k -Werte unter ca. 23Ω . Bezogen auf die MS-Seite liegen die Z_k -dominierenden X_k -Werte in der Größenordnung der Reaktanz des HS/MS-Transformators. Dies bedeutet, dass die Spannungssensitivität der HS-Ebene $\frac{\delta U_{Knoten\ HS}}{\delta Q_{Quelle}}$ näher zu untersuchen ist und ggf. ein zulässiger Spannungsbereich für einen Blindleistungsabruf am NVP zum überlagerten Netzbetreiber abzustimmen ist.

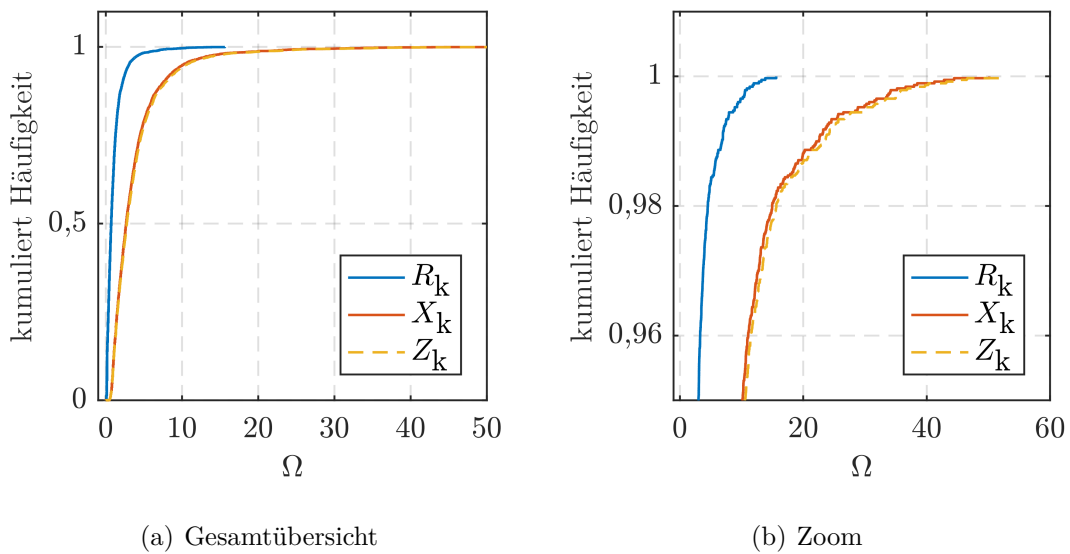


Abbildung 3.19: Auf HS-Ebene bezogene Kurzschlussimpedanz an HS/MS-Netzknoten von Deutschland.

Die Impedanz der HS-Ebene könnte direkt im Netzmodell hinterlegt werden. Hierdurch würde die Spannungssensitivität der HS-Ebene bei Auswertung der Sensitivität an der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators mit berücksichtigt werden. Allerdings stellt sich hierbei wiederum die Frage nach der Arbeitspunktabhängigkeit der Spannungssensitivität. In der HS-Ebene wird aufgrund der physikalischen Eigenschaften der heute vorwiegend genutzten Freileitung die maximal übertragbare Leistung einer Leitung entscheidend von der Spannungshaltung beeinflusst. Während man in der MS-Ebene selbst bei langen Leitungslängen noch auf dem nahezu linearen Bereich der liegenden Parabel, auch „Nasenkurve“ genannt, im $U(P)$ -Diagramm liegt, ist in der HS-Ebene die Begrenzung durch den Wendepunkt der Parabel deutlich ausgeprägter⁹². Abbildung 3.20 zeigt die

⁹²Der Wendepunkt kennzeichnet denjenigen Arbeitspunkt, an dem eine Leistungsanpassung erreicht wird ($Z_{Leitung} = Z_{Verbraucher}$). Würde man die Leistung am Verbraucher weiter

Verläufe der Äquipotenziallinien der Spannung einer 100 km langen HS-Leitung (Donaumast mit zwei Systemen Al/St 435/55 mit $S_r=686$ MVA, $R = 1,6 \, \Omega$, $X = 13 \, \Omega$ und $\frac{X}{R} = 8$) bei verschiedenen Arbeitspunkten. Dargestellt sind Arbeitspunkte innerhalb des Spannungsbands 96 kV bis 123 kV und bis zu einer maximalen Leitungsauslastung von 100 % von S_r ⁹³. Deutlich zu erkennen ist, dass die Äquipotenziallinien stark gekrümmt sind und sich ihr Abstand bei betragsmäßig hohen Wirkleistungsarbeitspunkten stark verengt. Dies sagt aus, dass die Spannungssensitivität stark vom Arbeitspunkt beeinflusst wird. Auffällig ist, dass anders als in der MS-Ebene Arbeitspunkte mit P kleiner oder gleich 0 % auftreten, bei denen das Spannungsniveau unter der Nennspannung liegt. Dies liegt an den Verlusten der Leitung. Beim Arbeitspunkt P gleich -50 % von S_r und Q gleich 0 % von S_r der Modelllast stellt sich beispielsweise ein Spannungsniveau von ca. 0,98 p. u. ein. Die Verluste der Leitung betragen 121 MVar und 16 MW.

Der Verlauf der Spannungssensitivität $\frac{\delta U}{\delta Q}$ ist in Abbildung A.11 im Anhang A.8 dargestellt. Der größte auftretende Wert liegt bei ca. $-0,016 \frac{\text{p.u.}}{\%}$ bzw. ca. $-0,002 \frac{\text{p.u.}}{\text{MVar}}$. Die auf den Blindleistungsabruf normierte Spannungssensitivität ist wegen der deutlich höheren Übertragungskapazität der HS-Leitung um eine Zehnerpotenz niedriger als bei der betrachteten MS-Freileitung mit 20 km Länge. Dies stellt immer noch eine extreme Betrachtung dar, da wie im Folgenden erläutert Arbeitspunkte mit hohen Sensitivitätswerten aufgrund von Stabilitätsbedingungen in der Realität nicht zwangsläufig einstellbar sind.

Durch Darstellung der Spannungswerte als Fläche und Drehung erhält man die in Abbildung 3.21 dargestellte $U(P, Q)$ -Fläche, in der sich aufgrund der diskreten Spannungsniveaus und dargestellten Gitterelemente einzelne „Nasenkurven“ in der U - P -Ebene abzeichnen. Die Fläche krümmt sich entlang der Wirkleistungsachse mit steigenden induktiven Blindleistungswerten zunehmend, wodurch bei hohen induktiven Blindleistungswerten schon bei kleinen Wirkleistungswerten die Stabilitätsgrenze erreicht wird, bei der die Simulation abbricht und in Folge die Spannungsfläche „abreißt“. Dieses Verhalten ist bei Blindleistungswerten grö-

„steigern“, d. h. seinen Widerstand verringern, würde sich der Strom erhöhen und die Spannung weiter absinken, weshalb die übertragbare Leistung in Folge absinken würde (unterer Ast der „Nasenkurven“). Je nach Spannungsabhängigkeit der Verbraucher kann dies zum Spannungskollaps führen, weshalb in der Praxis ein Sicherheitsabstand von der maximal übertragbaren Leistung gehalten wird bzw. diese durch Kompensationsanlagen vergrößert wird.

⁹³Anzumerken ist, dass die Auslegung von HS-Netzen $(n - 1)$ -sicher erfolgt und deshalb der Arbeitsbereich in der Praxis weiter einschränkbar ist.

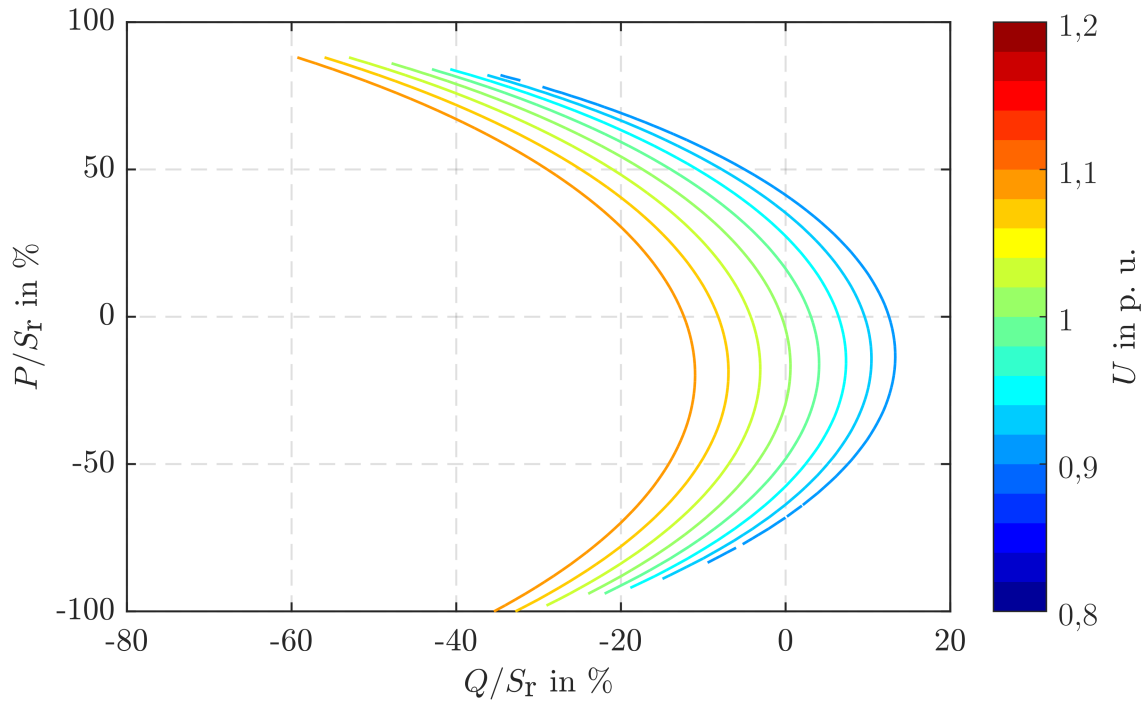


Abbildung 3.20: Äquipotenziallinien des Spannungsniveaus am Ende der HS-Leitung bei verschiedenen Arbeitspunkten und Limitierung der Arbeitspunkte auf einen Spannungsbereich zwischen 96 kV und 123 kV und bis zu einer maximalen Leitungsauslastung von 100 %.

ßer null und bezogen auf die Wirkleistungsachse nahezu symmetrisch, da eine Wirkleistungsrückspeisung aufgrund des hohen $\frac{X}{R}$ -Verhältnisses den spannungsenkenden Effekt eines induktiven Blindleistungsflusses nur geringfügig kompensiert.

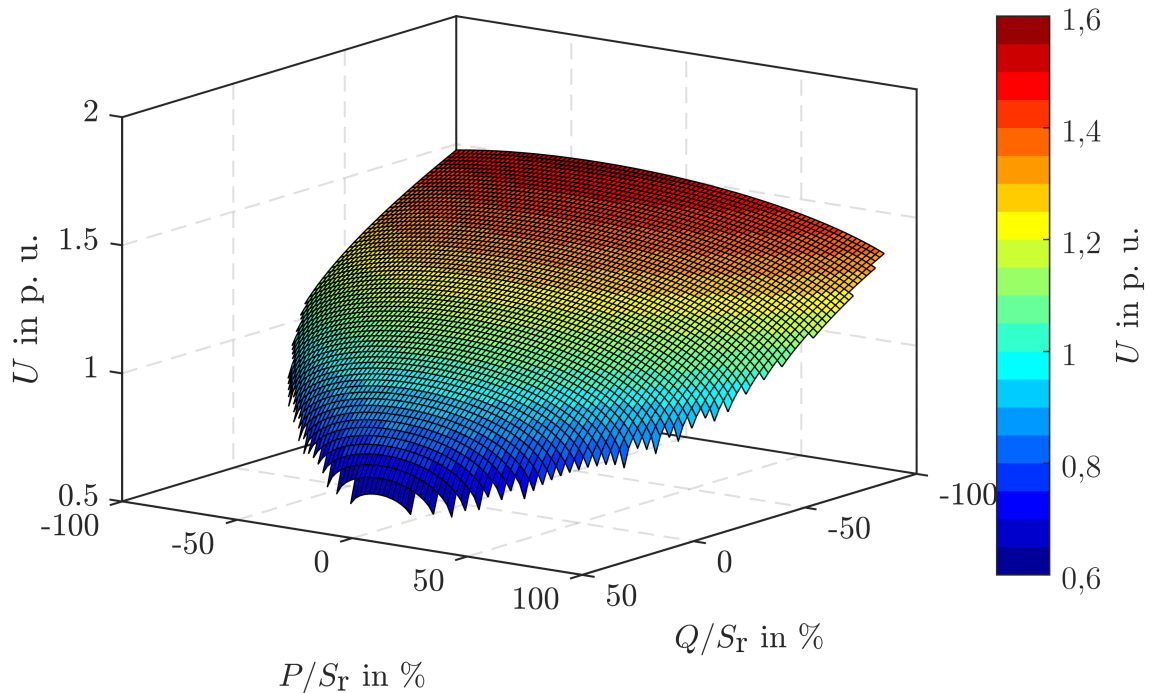


Abbildung 3.21: Räumliche Darstellung der Äquipotenziallinien des Spannungsniveaus am Ende der HS-Leitung bei verschiedenen Arbeitspunkten mit Limitierung der maximalen Leitungsauslastung auf 100 %. Spannungsgrenzen sind nicht hinterlegt, wodurch die Simulation auch bei Erreichen der Stabilitätsgrenze abbricht.

Zwischenfazit

Für das zu entwickelnde Verfahren ist folglich zu beachten, dass ein Blindleistungsabruf aus der MS-Ebene auch das Spannungsniveau an der Oberspannungsseite des HS/MS-Transformators beeinflusst. Aufgrund der deutlich größeren Übertragungskapazitäten der HS-Leitung ist der Einfluss in $\frac{p. u.}{MVA_r}$ deutlich geringer als in der MS-Ebene. Limitiert der Stellbereich des Stufenschalters am HS/MS-Transformator den Blindleistungsabruf, so kann nicht der komplette freie Stellbereich für einen Blindleistungsabruf eingeplant werden. Vielmehr ist mit dem HS-Netzbetreiber ein für den Blindleistungsabruf nutzbares Spannungsband zu definieren, das auch geeignete Sicherheitsabstände zur Stabilitätsgrenze und Überlagerungseffekte von Blindleistungsflüssen aus mehreren MS-Netzen berücksichtigt. Veranschlagt man z. B. einen Sicherheitsabstand sowohl in der Wirk- als auch in der Blindleistung von 15 % der Bemessungsleistung der Leitung, so reduziert sich der zulässige Arbeitsbereich weiter. Die maximale Sensitivität im

betrachteten Beispiel beträgt dann ca. $-0,0086 \frac{\text{p.u.}}{\%}$ bzw. $-0,0012 \frac{\text{p.u.}}{\text{MVAr}}$, wie Abbildung A.11 im Anhang A.8 entnommen werden kann. Im Idealfall ist der Blindleistungsabruf möglicherweise sogar spannungsstützend und damit stabilitätsfördernd (z. B. bezogen auf das in Abbildung 3.21 betrachtete Beispiel ist diese bei jedem kapazitiven Blindleistungsabruf gegeben).

3.2.1.6 Analyse der Leistungssensitivität der MS-Ebene

Abbildung 3.22 zeigt die Äquipotenziallinien der auf die Bemessungsleistung S_r der Leitung normierten Wirk- und Blindleistungsverluste der beiden untersuchten MS-Leitungstypen für einen zulässigen Arbeitsbereich von $U_c \pm 10 \%$ und einer maximalen Leitungsauslastung von 100% . Zudem sind die Arbeitspunkte bei maximal reinem Wirk- bzw. Blindleistungsverhalten bei Verwendung der typischen Spannungsbandgrenzen ($U_c + 2 \%$ / -5%) über die roten Punkte angedeutet. Das Kabel zeigt durchwegs kapazitives Verhalten. Ausgehend vom Leerlauf mit Verlusten des Kabels in Höhe von ca. -6% der Nennscheinleistung führt jegliche Arbeitspunktänderung zu einer Reduzierung der Blindverluste bis minimal ca. 0% . Die Wirkverluste steigen vom Leerlauf mit ca. 0% auf maximal ca. 11% . Die Blindverluste der Freileitung steigen von ca. 0% im Leerlauf auf maximal ca. 21% . Die Wirkverluste betragen im Leerlauf ca. 0% und erreichen einen Maximalwert von ca. 18% .

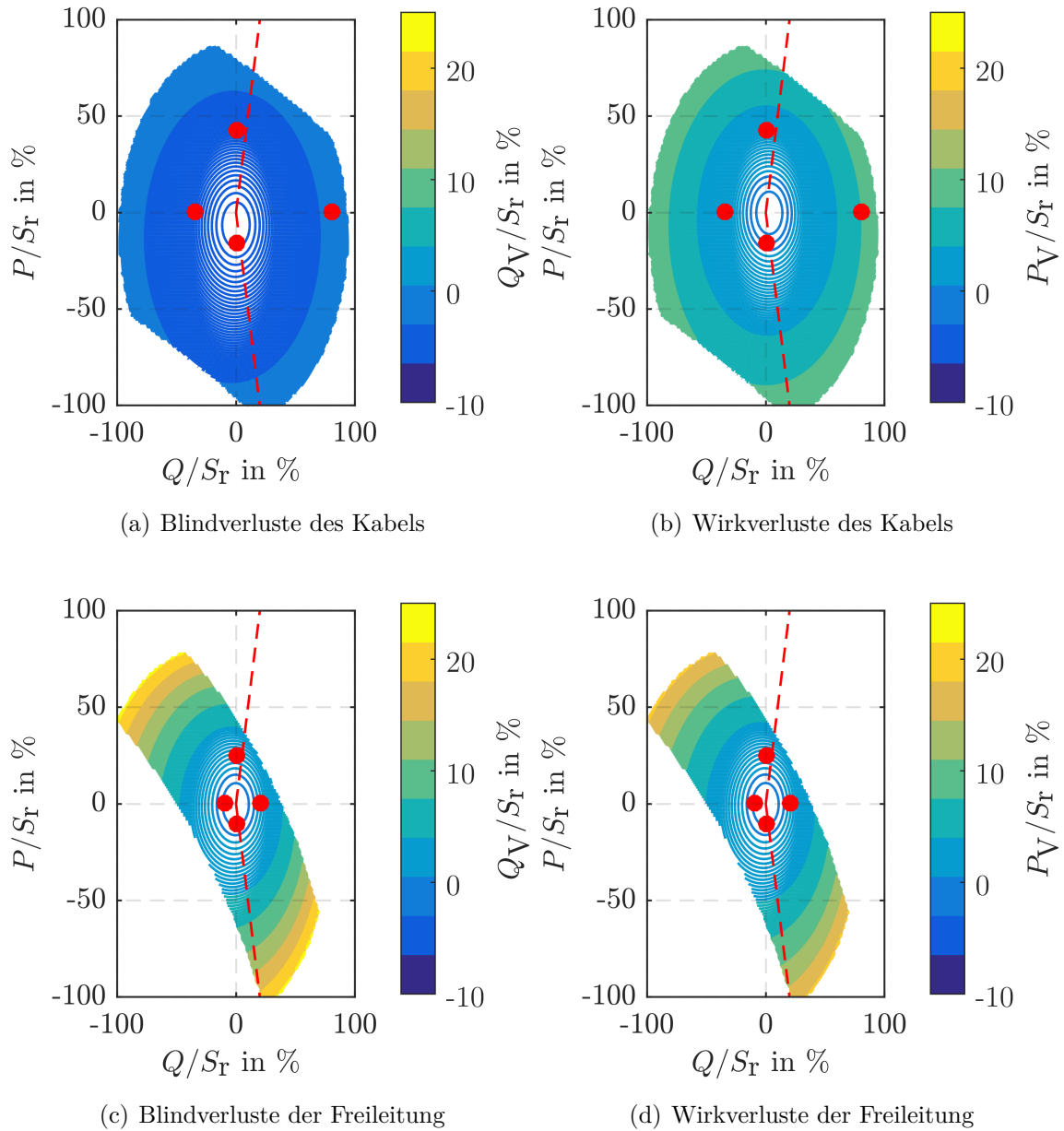


Abbildung 3.22: Auf Nennscheinleistung S_r normierte Verluste von Kabel und Freileitung bei einer Leitungslänge von 20 km in Abhängigkeit des Arbeitspunktes und in den Spannungsgrenzen $U_c \pm 10\%$ und einer maximalen Leitungsauslastung von 100 %. Die roten Punkte kennzeichnen die maximalen Arbeitspunkte bei reinem Wirk- bzw. Blindleistungsverhalten bei Verwendung typischer Spannungsbandgrenzen ($U_c + 2\%$ / -5%). Die gestrichelten roten Linien deuten ein heute typisches Blindleistungsverhalten an.

In Analogie zur Spannungssensitivität können über die Form und Lage der Äquipotenziallinien der Verluste Schlussfolgerungen auf die Sensitivität der Verluste hinsichtlich eines Blindleistungsabrufs abgeleitet werden. Hierzu spannen die rot gestrichelten Kennlinien in Abbildung 3.22, ausgehend von der Ordinate, einen Arbeitsbereich mit maximalem $\tan\varphi$ gleich 0,2 bei P gleich 100 % von S_r sowie Q gegen 0 % bei P gegen 0 % von S_r auf. Dies spiegelt die heutige Netzsituation mit hoher Wirkleistungsdominanz der Lasten und einem der Wirkleistung folgenden Blindleistungsbedarf wieder. Die Verluste auf den Leitungen stellen sich als kreisförmige Äquipotenziallinien dar. Der Mittelpunkt der Kreise liegt nahezu im Ursprung, weshalb ein Blindleistungsabruf ca. maximal die gleichen Verluste wie ein Wirkleistungsabruf verursacht. Zu beachten ist, dass die Verluste quadratisch von der Leitungsauslastung abhängen und somit mit steigendem „Radius“ die Verluständerung/-Sensitivität immer stärker zunimmt, räumlich gesehen entsteht ein Paraboloid.

Die „Blindleistungskomponenten“ des Gradienten der Wirk- und Blindverluste sind für die betrachteten Leitungen in Abbildung A.12 in Anhang A.9 dargestellt. Aufgrund der kreisförmigen Ausprägung und der quadratischen Abhängigkeit ergeben sich Sensitivitätswerte, die nahezu unabhängig vom Wirkleistungsarbeitspunkt sind. Die Minimalwerte liegen im Bereich um Q gleich null und die Extrema bei maximal induktivem bzw. kapazitivem Arbeitspunkten. Zu beachten ist, dass der Gradient/die Sensitivität einen Vorzeichenwechsel durchläuft. Negative Werte bedeuten keine Verlustabnahme, sondern deuten mathematisch an, dass die Steigung der Tangente am Paraboloid negativ ist. Die Verluste nehmen somit ausgehend vom Scheitelpunkt des Paraboloids in Richtung kapazitiveren bzw. induktiveren Verhalten zu. Ausgehend von heute typischen Blindarbeitspunkten, weist allerdings ein induktiver Blindleistungsabruf einen schnelleren Anstieg der Sensitivität auf⁹⁴. Die Sensitivität der Freileitungsverluste gegenüber einem Blindleistungsabruf ist höher ausgeprägt als beim Kabel. Bei der Freileitung führt z. B. eine Verdopplung der Blindleistung von 20 auf 40 % von S_r bei P gleich 100 % von S_r jeweils zu einer Zunahme der Wirk- und Blindleistungsverluste von ca. 3 % von S_r . Beim Kabel ist die Zunahme nur ca. halb so groß. Die Maximalwerte von ca. $0,4 \frac{\%}{\%}$ ⁹⁵ bei der Freileitung bzw. ca. $0,2 \frac{\%}{\%}$ beim Kabel werden an

⁹⁴Dieser Effekt kann auf die Reaktanz der Leitung zurückgeführt werden, deren induktiver Blindleistungsbedarf ein kapazitives Verhalten der Last am Ende der Leitung teilkompensiert bzw. ein induktives Verstärkt, was sich letztendlich auf die Auslastung der Leitung auswirkt.

⁹⁵Die Einheit $\frac{\%}{\%}$ drückt die Verluständerung in % von S_r der Leitung je Blindleistungsabruf in % von S_r der Leitung aus.

der Freileitung bei hoher Rückspeisung und gleichzeitig hohen induktiven Werten in einem sehr begrenzten Bereich erreicht.

Die relative Änderung der Sensitivität der Verluste je MVar Blindleistungsabruf wird analog zur Spannungssensitivität ausgewertet. Da die Sensitivitätswerte der Verluste über dem Blindleistungsarbeitsbereich nicht monoton wachsen, wird lediglich die Änderung bezogen auf ein heute typisches Blindleistungsverhalten in Richtung eines induktiveren Verhaltens ausgewertet, siehe Abbildung 3.23. Der Unterschied zwischen Wirk- und Blindverluständerung ist vernachlässigbar. Die Maxima mit ca. 40 % je MVar beim Kabel bzw. ca. 65 % je MVar bei der Freileitung treten bei maximalen Wirkleistungsbezug auf, bei dem eine kleine Sensitivität in Kombination mit einem kleinen Blindleistungsarbeitsbereich vorliegt. Die augenscheinlich hohen Korrekturfaktoren sind durchaus praktikabel, wenn man berücksichtigt, dass die Sensitivitätswerte bei heute üblichen Ausgangsarbeitspunkten selbst im betrachteten Worst-Case-Modell nahe null liegen (siehe Abbildung A.12 in Anhang A.9).

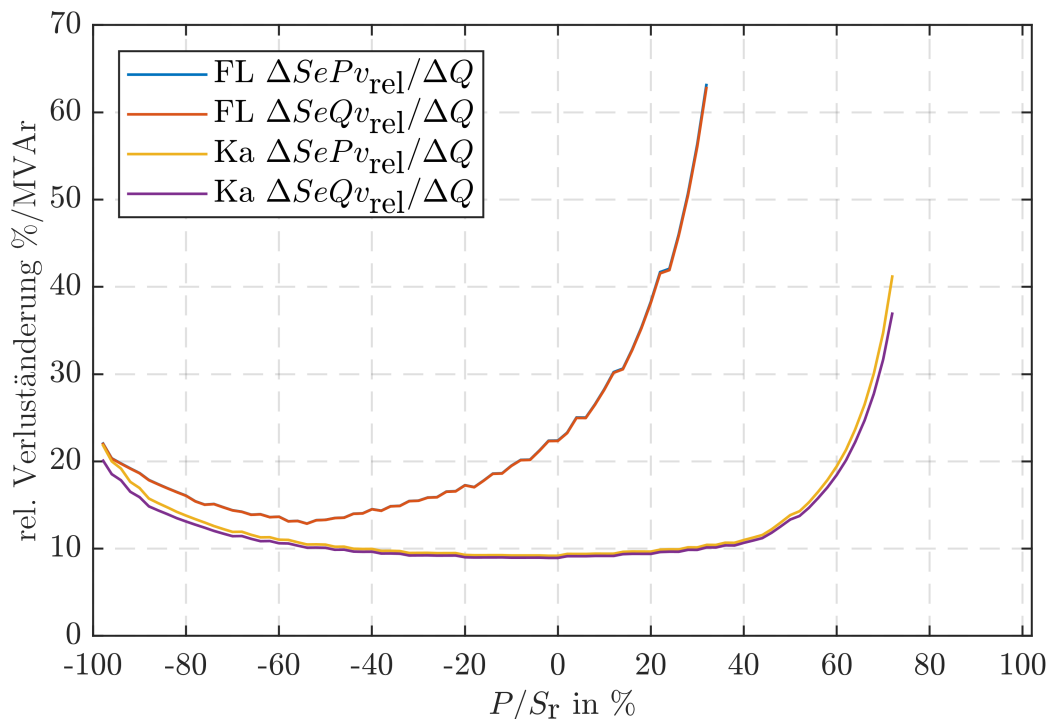


Abbildung 3.23: Maximal mögliche Änderung der Verlustsensitivität an den betrachteten MS-Leitungen in % der minimalen Sensitivität bei heute typischen Blindleistungsarbeitspunkten bei konstantem P und normiert je MVar Blindleistungsabruf.

3.2.1.7 Analyse der Leistungssensitivität der HS/MS-Ebene

Bezüglich der Transformatorverluste wird eine analoge Auswertung wie bei den beiden MS-Leitungen durchgeführt. Hierbei wird das Transformatormodell aus der Betrachtung der Spannungssensitivität der HS/MS-Ebene aus Abschnitt 3.2.1.4 verwendet. Abbildung 3.24 zeigt die entsprechenden Ergebnisse. Prinzipiell gelten die gleichen Aussagen wie für die Verluste der MS-Freileitung, allerdings liegen die Werte des Wirkleistungsverlustgradienten um eine Zehnerpotenz niedriger (maximal 1 % des Blindleistungsabrufs) und der normierte Maximalwert der Wirkverluste beträgt nur ca. 2 % von dem der Freileitung. Hinsichtlich der Arbeitspunktänderung durch einen Blindleistungsabruf können die Wirkverluste mit maximal 160 kW bei 100 % Auslastung in guter Näherung vernachlässigt werden. Die Blindleistungsverluste am Transformator sind durchwegs induktiv und können deshalb einen kapazitiven Blindleistungsabruf schwächen bzw. einen induktiven verstärken, was vor allem bei Abrufen an wirkleistungsschwachen Arbeitspunkten relevant ist.

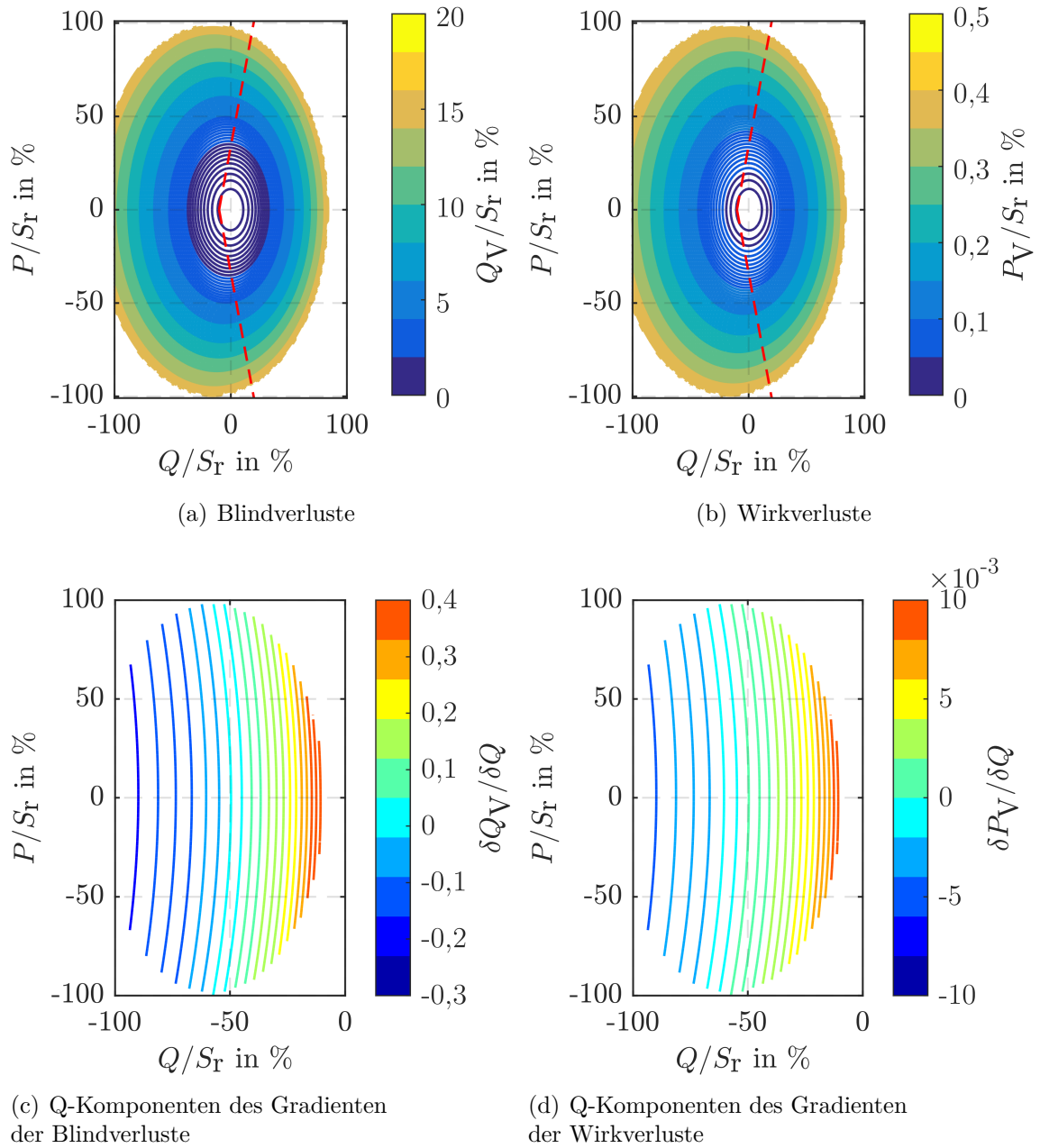


Abbildung 3.24: Verluste am HS/MS-Transformator ($S_r = 40$ MVA) in Abhängigkeit des Arbeitspunktes sowie einer Transformatorauslastung kleiner oder gleich 100 %. Die gestrichelten roten Linien deuten ein heute typisches Blindleistungsverhalten an.

Aufgrund des im Vergleich zu den MS-Leitungen größeren zulässigen Arbeitsbereichs, ergeben sich an den beiden Wirkleistungsextrema die Extrema der relativen Sensitivitätsänderung je MVar in Höhe von ca. 9 % je MVar. Wie bei den MS-Leitungen treffen hier eine niedrige Sensitivität (um null) mit einem kleinem Blindleistungsarbeitsbereich zusammen. Auch beim Transformator zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen der Änderung der Wirk- und Blindverlustsensitivität.

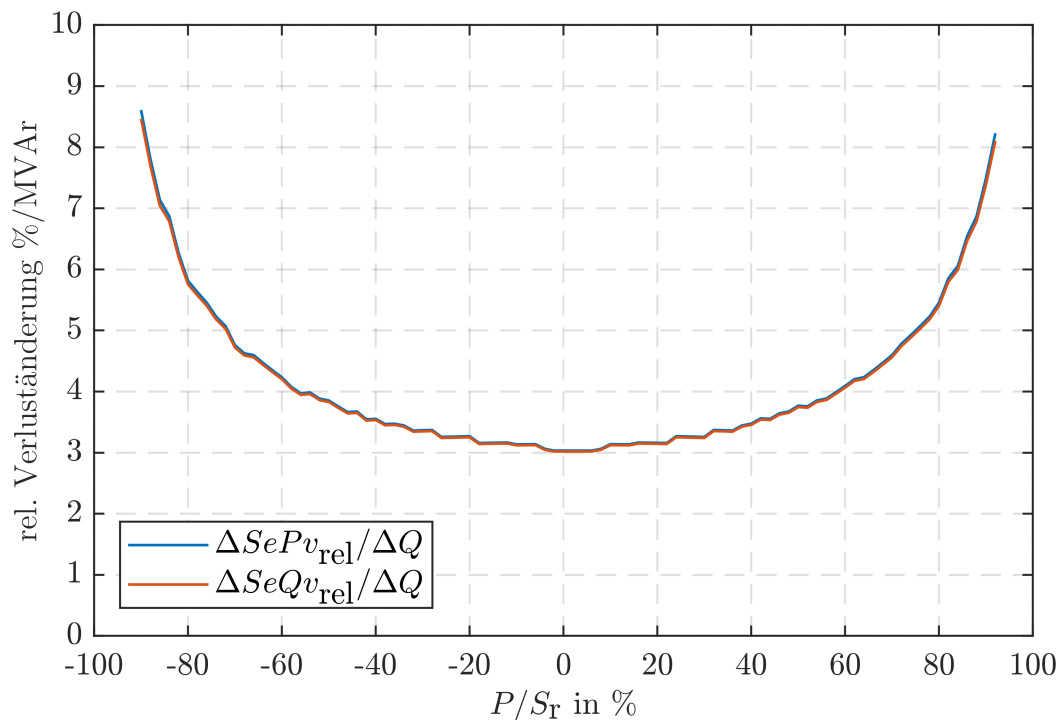


Abbildung 3.25: Maximal mögliche Änderung der Verlustsensitivität am HS/MS-Transformator in % der minimalen Sensitivität bei heute typischen Blindleistungsarbeitspunkten bei konstantem P und normiert je MVar Blindleistungsabruf.

3.2.2 Entwicklung der Netz-Restriktionsanalyse für eine einzelne Blindleistungsquelle

Bevor ab Abschnitt 3.2.2.2 auf die detaillierte Berechnung und einzelne zu beachtende Aspekte der Netz-Restriktionsanalyse eingegangen wird, wird zunächst in Abschnitt 3.2.2.1 das grundlegende Vorgehen erläutert.

3.2.2.1 Grundlagen der Netz-Restriktionsanalyse

Im Fokus der Netz-Restriktionsanalyse steht die Ermittlung von zulässigen Grenzwerten für einen Blindleistungsabruf unter Berücksichtigung von Strom- und Spannungsbandgrenzen. Die Einhaltung von Blindleistungsgrenzwerten der Blindleistungsbilanz einer MS-Gruppe, d. h. der konkrete Blindleistungsbedarf, sowie das tatsächlich vorhandene Potenzial der Blindleistungsquellen spielen hierbei noch keine Rolle, sondern erst im Rahmen des Koordinationsalgorithmus in Abschnitt 3.3. Als Ergebnis ergibt sich, die von einem ausgewählten Netzknoten maximal abrufbare Blindleistung unter Berücksichtigung von Spannungs- und Auslastungsrestriktionen der Knoten- und Zweigelemente.

Eingangsdaten der Netz-Restriktionsanalyse sind die Ergebnisse der Netz-Sensitivitätsanalyse, d. h. die ermittelten Spannungs- ($\frac{\delta U_i}{\delta Q_{\text{Quelle}}}$) und Leistungssensitivitätswerte ($\frac{\delta P_m}{\delta Q_{\text{Quelle}}}$ und $\frac{\delta Q_m}{\delta Q_{\text{Quelle}}}$) der i Knoten- und m Zweigelemente⁹⁶ für die bewerteten Arbeits-/Berechnungszeitpunkte⁹⁷ der Netzsimulation. Darüber hinaus werden die nutzbaren Leistungs- und Spannungsfreiräume sowie die Grenzwerte der Spannungshaltung und Betriebsmittelbelastbarkeit benötigt. Leistungs- und Spannungsgrenzwerte sind i. d. R. bekannte Planungsgrößen der Netzplanung. Die Netz-Restriktionsanalyse arbeitet mit Leistungswerten, weshalb der Stromgrenzwert eines Zweigelements durch einen maximalen Scheinleistungswert $S_{\text{Grenz max } m}$ beschrieben wird. Je Knotenelemente gibt es zwei Spannungsgrenzwerte $U_{\text{Grenz max } i}$ und $U_{\text{Grenz min } i}$. Für jeden Berechnungszeitpunkt werden die freien Spannungs- und Leistungsfreiräume ermittelt. Aus Sicht der Spannungshaltung sind dies ausgehend von der Spannung am Berechnungszeitpunkt $|\underline{U}_i(w, \Delta t)|$ für den kapazitiven Abruf das freie Spannungsband $U_{\text{frei } i}(w, \Delta t)$ in Richtung des oberen Grenzwerts bzw. in Analogie das minimale freie Spannungsband in Richtung des unteren Grenzwerts für den induktiven Abruf. Die freie Übertragungskapazität $S_{\text{frei } m}(w, \Delta t)$ eines Zweigelements wird von der auftretenden Belastung am jeweiligen Berechnungszeitung $S_m(w, \Delta t)$ bestimmt und ergibt sich über den Abstand zur maximal zulässigen Belastung $S_{\text{Grenz max}}$. Je nach Art des Blindleistungsabrufs ergibt sich ein eigener Wert, da der Blindleistungsfluss am Arbeitspunkt den Blindleistungsabruf verstärkt oder abschwächt. Formel 3.7a

⁹⁶Im Weiteren wird für die Elemente der Netztopologie der Index i für Knotenelemente und der Index m für Zweigelemente eingeführt.

⁹⁷I. d. R. werden die zu untersuchenden Arbeitspunkte dem Netzmodell als Zeitreihe mit diskreten Werten und äquidistanter Schrittweite übergeben. Im Folgenden wird dies als eine Abhängigkeit von den Variable w und Δt ausgedrückt. Bei auf 15-Minuten-Mittelwerten basierenden Jahreszeitreihen beträgt $\Delta t = 15$ Min und $w = 1, 2, 3, \dots, 35040$.

bis 3.7d zeigen die entsprechenden Gleichungen zur Bestimmung der Freiräume.

$$U_{\text{frei kap } i}(w, \Delta t) = U_{\text{Grenz max } i} - |\underline{U}_i(w, \Delta t)| \quad (3.7a)$$

$$U_{\text{frei ind } i}(w, \Delta t) = |\underline{U}_i(w, \Delta t)| - U_{\text{Grenz min } i} \quad (3.7b)$$

$$S_{\text{frei ind } m}(w, \Delta t) = S_{\text{Grenz max } m} - S_m(w, \Delta t) \quad (3.7c)$$

$$S_{\text{frei kap } m}(w, \Delta t) = | - S_{\text{Grenz max } m} - S_m(w, \Delta t) | \quad (3.7d)$$

Die Leistungs- und Spannungsfreiräume können, wie eben beschrieben, berechnet werden, indem die Spannungsniveaus und Leitungsbelastungen über z. B. Worst-Case-Szenarien oder Zeitreihensimulationen bestimmt werden. Alternativ können direkt Auslastungs- und Spannungsbänder definiert werden, die den maximalen Einfluss eines Blindleistungsabrufs begrenzen (z. B. maximale Spannungsanhebung von 0,01 p. u. je Netzknoten). Da die Grenzwerte zweig- und knotenscharf definierbar sind, können unter anderem auch inhomogene Auslastungs-/Spannungsbandgrenzen berücksichtigt werden (z. B. erweiterte Spannungsgrenzwerte durch den Einsatz von RONT). Bei der Bestimmung der nutzbaren Spannungsbänder ist auch das Regelband der Stufenschaltregelung am HS/MS-Transformator zu berücksichtigen (siehe Abschnitt 2.4.2).

Durch Multiplikation der Spannungs- und Leistungsfreiräume mit den entsprechenden Kehrwerten der Sensitivität⁹⁸ erhält man die maximal abrufbare Blindleistung aus Sicht jedes Knoten- und Zweigelementes für jeden Berechnungszeitpunkt, siehe Formel 3.8a bis 3.8d. Die Invertierung der Spannungssensitivität in Formel 3.8a und 3.8c erfolgt, da in Anlehnung an die Vorzeichennomenklatur von PowerFactory (Erzeugerzählpfeilsystem) davon ausgegangen wird, dass eine positive Sensitivität eine spannungsanhebende Wirkung eines kapazitiven Blindleistungsabrufs beschreibt und dieser im Verbrauchzählpfeilsystem ein negatives Vorzeichen erhält.

⁹⁸Die Leistungssensitivität, die aus $\frac{\delta P_m}{\delta Q_{\text{Quelle}}}$ und $\frac{\delta Q_m}{\delta Q_{\text{Quelle}}}$ besteht, wird vereinfacht über $\frac{\delta S_m}{\delta Q_{\text{Quelle}}}$ dargestellt.

$$Q_{\max \text{ kap Knoten } i}(w, \Delta t) = (-1) \cdot U_{\text{frei kap } i}(w, \Delta t) \cdot \left(\frac{\delta U_i(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \right)^{-1} \quad (3.8a)$$

$$Q_{\max \text{ ind Knoten } i}(w, \Delta t) = U_{\text{frei ind } i}(w, \Delta t) \cdot \left(\frac{\delta U_i(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \right)^{-1} \quad (3.8b)$$

$$Q_{\max \text{ kap Zweig } m}(w, \Delta t) = (-1) \cdot S_{\text{frei ind } m}(w, \Delta t) \cdot \left(\frac{\delta S_m(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \right)^{-1} \quad (3.8c)$$

$$Q_{\max \text{ kap Zweig } m}(w, \Delta t) = S_{\text{frei kap } m}(w, \Delta t) \cdot \left(\frac{\delta S_m(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \right)^{-1} \quad (3.8d)$$

Die zu einem Berechnungszeitpunkt f maximal abrufbare Blindleistung ergibt sich als Minimum über alle Knoten und Zweigelemente nach Formel 3.9a und 3.9b. Eine über alle Berechnungszeitpunkte abrufbare kapazitive bzw. induktive Blindleistung ergibt sich nach Formel 3.9c und 3.9d abschließend durch Ermittlung des Minimalwertes über alle Knoten- und Zweigelemente, sowie über alle Berechnungszeitpunkte der Netzsimulation. Analog ist es möglich, einzelne Gruppen von Arbeitspunkten (später als Eingriffsklassen bezeichnet) zu definieren und für diese die maximalen abrufbare Blindleistung zu bestimmen, was im Rahmen des Algorithmus zur Koordination des Blindleistungsabrufs aus mehreren Blindleistungsquellen in Abschnitt 3.3 verwendet wird. Anzumerken ist, dass es u. U. aus Sicht der HS-Ebene notwendig ist, einen zusätzlichen Blindleistungsgrenzwert zu definieren, um Stabilitätsgrenzwerte einzuhalten.

$$Q_{\max \text{ kap}}(w = f, \Delta t) = \min(Q_{\max \text{ kap Knoten } i}(w = f, \Delta t), Q_{\max \text{ kap Zweig } m}(w = f, \Delta t)) \quad (3.9a)$$

$$Q_{\max \text{ ind}}(w = f, \Delta t) = \min(Q_{\max \text{ ind Knoten } i}(w = f, \Delta t), Q_{\max \text{ ind Zweig } m}(w = f, \Delta t)) \quad (3.9b)$$

$$Q_{\max \text{ kap}} = \min(Q_{\max \text{ kap Knoten } i}(w, \Delta t), Q_{\max \text{ kap Zweig } m}(w, \Delta t)) \quad (3.9c)$$

$$Q_{\max \text{ ind}} = \min(Q_{\max \text{ ind Knoten } i}(w, \Delta t), Q_{\max \text{ ind Zweig } m}(w, \Delta t)) \quad (3.9d)$$

Einfluss der Arbeitspunktabhängigkeit der Sensitivitätswerte

In Abschnitt 3.2.1 konnte gezeigt werden, dass die Werte der Spannungs- und Leistungssensitivität bei konstanter Wirkleistung vom Blindleistungsarbeitspunkt und

somit vom Blindleistungsabruf abhängig sind. Aus Sicht der Spannungshaltung steigt die Sensitivität der Knotenelemente betragsmäßig bei einem induktiven und sinkt mit einem kapazitiven Blindleistungsabruf. Bei der Leistungssensitivität ist zu berücksichtigen, dass sich neben dem durch einen Blindleistungsabruf verursachten Blindleistungsfluss auch die Verluste der Leitung ändern. Eine Verlustzunahme ist hier sowohl bei induktiven als auch bei kapazitiven Blindleistungsabrufen möglich und hängt von der Höhe des Blindleistungsabrufs und dem anfänglichen Blindleistungsarbeitspunkt ab.

Ziel der Netz-Restriktionsanalyse ist es, planerisch sichere Werte für einen maximal zulässigen Blindleistungsabruf zu bestimmen, weshalb im Folgenden die Arbeitspunktabhängigkeit bzw. die Unsicherheit bei der Bestimmung der Sensitivitätswerte, in Anlehnung an die in Abschnitt 3.2.1 durchgeführten Auswertungen, über lineare Korrekturterme berücksichtigt wird. D. h. die am Arbeitspunkt ermittelten Sensitivität wird um einen definierter Wert korrigiert⁹⁹, der sich in Abhängigkeit der abzurufenden Blindleistung ergibt. Der Korrekturfaktor besitzt die Einheit $\frac{\%}{\text{MVar}}$ und ist in den Formeln der nachfolgenden Abschnitten über die Symbolbezeichnung „ KF “ gekennzeichnet (z. B. KF_{SeU}). Der jeweilige Korrekturfaktor gibt somit die relative Sensitivitätsänderung je MVar eingesetzter Blindleistung an. Die absolute Spannungs- oder Leistungsänderung ergibt sich über eine „Trapezintegration“¹⁰⁰ des Sensitivitätswerts am Ausgangsarbeitspunkt, des mittels Korrekturfaktor bestimmten Sensitivitätswerts und dem Blindleistungsabruf. Diese vereinfachte Korrektur basiert auf folgenden Feststellungen:

- Die Werte der Spannungskorrekturfaktoren betragen trotz des in Abschnitt 3.2.1 untersuchten extremen Netzmodells nur wenige % pro MVar.
- Die Wirk- und Blindverlustkorrekturfaktoren weisen deutlich höhere Werte auf (≤ 65 % je MVar), beziehen sich allerdings selbst im betrachteten Worst-Case-Modell auf Sensitivitätswerte nahe null, bei Normierung auf heute typische Blindleistungsarbeitspunkte (siehe 3.2.1.6).
- Hohe Änderungen der Sensitivität sind primär bei hohen induktiven Arbeitspunkten und an den Rändern des zulässigen Arbeitsbereichs zu erwarten.
- Mit sinkender Netzimpedanz nimmt die Arbeitspunktabhängigkeit deutlich ab (siehe MS-Leitung mit 1 km und 20 km Länge).

⁹⁹Die Berechnung muss folglich iterativ ausgeführt werden.

¹⁰⁰Es findet nur eine vereinfachte Integration statt, da nur die Ränder des zu integrierenden Bereichs bekannt sind.

Die vorgenommene lineare und über ein Worst-Case-Modell abgeleitete Arbeitspunktkorrektur führt zu einer systematischen und bewusst gewollten Überschätzung des Einflusses eines Blindleistungsabrufs auf die Spannungshaltung bzw. Betriebsmittelauslastung. Die Umsetzung als relative Arbeitspunktkorrektur bewirkt hingegen, dass die Sicherheitsmargen verhältnismäßig ausfallen, da geringere Sensitivitätswerte als im Worst-Case-Modell auftreten. Hinzuweisen ist, dass die ermittelten Korrekturfaktoren in Abschnitt 3.2.1 auf heute typische oder Arbeitspunkte mit geringer Sensitivität normiert sind. Bei Anwendung auf abweichende Arbeitspunkte (z. B. aufgrund eines deutlichen Anstiegs von Blindleistungsflüssen im Normalnetznutzungszustand), kommt es zu deutlichen Einflussüberschätzungen, derer durch eine Anpassung der Normierung entgegengewirkt werden kann. Ausgehend von heute typischen Arbeitspunkten wird auf eine Korrektur (d. h. Reduzierung) der Spannungssensitivitätswerte bei kapazitiven Blindleistungsabrufen verzichtet, da diese anders als bei induktiven Abrufen nur geringfügig absinken würden.

3.2.2.2 Bestimmung der maximal abrufbaren Blindleistung aus Sicht der Spannungshaltung

Die Bewertung der maximal abrufbaren Blindleistung in Abhängigkeit der Spannungshaltung $Q_{\max}(U)$ ist sinnvollerweise differenziert nach Netzabschnitten und ausgehend von oberen Spannungsebenen durchzuführen. Grund hierfür sind Regeleinrichtungen im Netz, die einzelne Spannungsebenen voneinander entkoppeln. Im hier betrachteten Fall ist dies der Stufenschalter des HS/MS-Transformators. Die relevanten Netzabschnitte für das hier diskutierte Steuerungsverfahren sind die HS/MS- und die MS-Ebene. Die HS-Ebene wird im Rahmen dieser Arbeit nicht detailliert betrachtet, sondern über einzuhaltende Spannungs- und Leistungsgrenzwerte am HS/MS-Transformator berücksichtigt.

HS/MS-Ebene

An der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators sind prinzipiell die Spannungsgrenzwerte durch die Regelbandgrenzen der Stufenschalterregelung gegeben, die meist symmetrisch um den Sollwert liegen. Aufgrund der Schwankung der Spannung an der HS-Seite des Transformators wird dieses Band i. d. R. bereits komplett genutzt, und es ergäbe sich kein abrufbares Blindleistungspotenzial.

Wichtig ist es deshalb, den Stellbereich der Stufenschalterregelung zu berücksichtigen. „Freie“ Stufen können für einen kapazitiven oder induktiven Blindleistungsabruf genutzt werden.

Die „belegten“ Stufen können entweder über eine Messzeitreihe der 110-kV-Spannung oder ein Simulationsmodell bestimmt werden. Letzteres setzt voraus, dass die Spannungsschwankung der HS-Ebene und die Stufenschalterregelung nachgebildet sind (z. B. über die Abbildung des HS-Netzes oder die Vorgabe der gemessenen 110-kV-Spannung). Anhand der Simulationsergebnisse kann direkt die Anzahl aktiver Stufen ermittelt werden, die über oder unter der Neutralposition liegen ($n_{\text{down}}(w, \Delta t)$ oder $n_{\text{up}}(w, \Delta t)$).

Liegt kein geeignetes Modell vor, so kann die Anzahl an belegten Stufen näherungsweise¹⁰¹ über die Messzeitreihe der 110-kV-Spannung hergeleitet werden¹⁰². Bei symmetrisch um den Spannungssollwert U_{soll} gelegtem Regelband U_{RB} ergeben sich die belegte Anzahl an Stufen durch Auflösung der Formeln 3.10 nach $n_{\text{down}}(w, \Delta t)$ und $n_{\text{up}}(w, \Delta t)$ ¹⁰³. Die Höhe der Stufenspannung $U_{\text{ST UW}}$ ist ein diskreter Wert¹⁰⁴, weshalb $n_{\text{down}}(w, \Delta t)$ und $n_{\text{up}}(w, \Delta t)$ auf einen ganzzahligen Wert aufgerundet werden müssen. Um spannungsebenenübergreifend rechnen zu können, müssen die Werte in p. u. eingesetzt werden.

$$U_{\text{Soll}} \pm \frac{U_{\text{RB}}}{2} = U_{\text{HS}}(w, \Delta t) - (n_{\text{down}}(w, \Delta t) \cdot U_{\text{ST UW}}) \quad (3.10a)$$

$$U_{\text{Soll}} \pm \frac{U_{\text{RB}}}{2} = U_{\text{HS}}(w, \Delta t) - (n_{\text{up}}(w, \Delta t) \cdot U_{\text{ST UW}}) \quad (3.10b)$$

Der technisch nutzbare Spannungsbereich des Stufenschalters $U_{\text{frei tech}}(w, \Delta t)$ für einen Blindleistungsabruf ergibt sich über die verbleibenden freien Stufen des Stufenschalters nach Formel 3.11a und 3.11b.

¹⁰¹Sind Messwerte von Ober- und Unterspannungsseite vorhanden, so kann bei ausreichender zeitlicher Auflösung das Übersetzungsverhältnis und damit die belegten Stufen exakt ermittelt werden.

¹⁰²Der Einfluss der Transformatorimpedanz geht hierbei allerdings verloren.

¹⁰³Denkbar sind je nach Größe der Stufenspannung und des Regelbandes mehrere Lösungen; hierbei wäre der kleinere Wert aufgrund der schrittweisen Stufung des Stufenschalters zu wählen.

¹⁰⁴Die Stufenspannung wird vereinfacht als konstant und damit unabhängig vom Übersetzungsverhältnis angenommen, wohl wissend, dass sich in der Realität leichte Unterschiede ergeben.

$$U_{\text{frei tech kap}}(w, \Delta t) = (n_{\text{down max}} - n_{\text{down}}(w, \Delta t)) \cdot U_{\text{ST UW}} \quad (3.11a)$$

$$U_{\text{frei tech ind}}(w, \Delta t) = (n_{\text{up max}} - n_{\text{up}}(w, \Delta t)) \cdot U_{\text{ST UW}} \quad (3.11b)$$

Der technisch nutzbare Spannungsbereich kann u. U. durch Spannungsgrenzen der HS-Ebene $U_{\text{HS max}}$ und $U_{\text{HS min}}$ weiter eingeschränkt werden, da die Bedingungen der Formel 3.12a und 3.12b gegeben sein müssen. Der minimale Spannungsgrenzwert der HS-Ebene kann dabei bereits einen Sicherheitsabstand zur Stabilitätsgrenze enthalten.

$$U_{\text{HS max}} \geq \max(U_{\text{HS}}(w, \Delta t) + U_{\text{frei tech kap}}(w, \Delta t)) \quad (3.12a)$$

$$U_{\text{HS min}} \leq \min(U_{\text{HS}}(w, \Delta t) - U_{\text{frei tech ind}}(w, \Delta t)) \quad (3.12b)$$

Werden die Bedingungen der Formel 3.11a und 3.11b nicht erfüllt, so ergibt sich das für einen Blindleistungsabruf nutzbare Spannungsband anhand Formel 3.13a und 3.13b.

$$U_{\text{frei kap}}(w, \Delta t) = U_{\text{HS max}} - U_{\text{HS}}(w, \Delta t) \quad (3.13a)$$

$$U_{\text{frei ind}}(w, \Delta t) = U_{\text{HS min}} + U_{\text{HS}}(w, \Delta t) \quad (3.13b)$$

Mittels der bestimmten Freiräume $U_{\text{frei}}(w, \Delta t)$ ¹⁰⁵ und dem Sensitivitätswert kann die über die HS/MS-Ebene abrufbare Blindleistung $Q_{\text{max HS/MS}}(w, \Delta t)$ über Formel 3.14a bis 3.14e bestimmt werden. Die in Abschnitt 3.2.1 beschriebene Arbeitspunktabhängigkeit wird hierbei über die Terme $KF_{\text{SeU HS}}$ und $KF_{\text{SeU HSMS}}$ in $\frac{\%}{\text{MVAr}}$ ausgedrückt. Der entsprechende Ansatz ist in Abschnitt 3.2.2.1 beschrieben.

¹⁰⁵Bei den Spannungsfreiräumen wird im Folgenden nicht mehr zwischen $U_{\text{frei tech}}$ und U_{frei} unterschieden, sondern nur noch U_{frei} geschrieben. Weiter werden aufgrund der Analogie zwischen induktivem und kapazitivem Blindleistungsabruf nur noch die Formeln für den induktiven Blindleistungsabruf beschrieben.

$$0 = a \cdot Q_{\max \text{ HS/MS}}(w, \Delta t)^2 + b \cdot Q_{\max \text{ HS/MS}}(w, \Delta t) - U_{\text{frei}}(w, \Delta t) \quad (3.14a)$$

$$a = HS + HSMS \quad (3.14b)$$

$$b = \frac{\delta U_{\text{HS}}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} + \frac{\delta U_{\text{HSMS}}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \quad (3.14c)$$

$$HS = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta U_{\text{HS}}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \cdot K F_{\text{SeU HS}} \quad (3.14d)$$

$$HSMS = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta U_{\text{HSMS}}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \cdot K F_{\text{SeU HSMS}} \quad (3.14e)$$

MS-Ebene

Für die MS-Ebene kann analog zur HS/MS-Ebene für jedes Knotenelement vorgegangen werden (Formel 3.15a). Es erfolgt eine separate Bewertung der MS-Ebene, da diese durch die Stufenschalterregelung von der HS-Ebene aus Sicht der Spannungshaltung bis auf die Spannungsschwankung innerhalb des Regelbandes entkoppelt ist. Eine Entkopplung der HS- und MS-Ebene liegt nur dann vor, solange der Stellbereich des HS/MS-Transformators in der Lage ist, die Spannungsschwankungen der HS-Ebene auszuregeln. Ist dies nicht der Fall, erlaubt die HS/MS-Ebene u. U. keinen Blindleistungsabruf aus der MS-Ebene¹⁰⁶. Bei der Bestimmung der Spannungsfreiräume nach Formel 3.7a und 3.7b ist zu beachten, dass die Spannungswerte $U_i(w, \Delta t)$ um den Totbandeinfluss des Stufenschalters korrigiert werden müssen. Der Korrekturwert ergibt sich aus dem Abstand der Spannung an der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators zur oberen bzw. unteren Totbandgrenze. Bei der Ermittlung der Sensitivitätswerte ist darauf zu achten, dass die Impedanz der überlagerten Spannungsebenen nicht enthalten ist, da deren Einfluss durch den Stufenschalter des HS/MS-Transformators ausgeglichen wird. Liegt ein Netzmodell mit Nachbildung der HS-, HS/MS- und MS-Ebene vor, ergibt sich die Spannungssensitivität der MS-Knoten durch Abzug des Wertes der Spannungssensitivität an der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators.

¹⁰⁶In einem solchen Fall ist zu prüfen, ob sich ein Blindleistungsabruf ggf. spannungsstützend auf die HS-Ebene auswirkt und somit trotzdem möglich wäre.

$$0 = a \cdot Q_{\max \text{ MS Konten } i}(w, \Delta t)^2 + b \cdot Q_{\max \text{ MS Knoten } i}(w, \Delta t) - U_{\text{frei } i}(w, \Delta t) \quad (3.15a)$$

$$a = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta U_{\text{MS } i}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \cdot K F_{\text{SeU MS}} \quad (3.15b)$$

$$b = \frac{\delta U_{\text{MS } i}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \quad (3.15c)$$

3.2.2.3 Bestimmung der maximal abrufbaren Blindleistung aus Sicht der Betriebsmittelauslastung

Die durch die maximale Belastung der m Zweigelemente¹⁰⁷ bestimmte maximal abrufbare Blindleistung $Q_{\max \text{ Zweig } m}(w, \Delta t)$ wird über die Wirk- und Blindleistungssensitivitätswerte ($\frac{\delta P_m(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}}$ und $\frac{\delta Q_m(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}}$) nach Formel 3.16 berechnet¹⁰⁸, die z. B. mittels quadratischer Ergänzung anhand der „Mitternachtsformel“¹⁰⁹ direkt gelöst werden kann.

$$S_{r \text{ } m}(w, \Delta t) = \sqrt{(P_m(w, \Delta t) + \Delta P(w, \Delta t))^2 + (Q_m(w, \Delta t) + \Delta Q(w, \Delta t))^2} \quad (3.16a)$$

$$\Delta P(w, \Delta t) = \frac{\delta P_m(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \cdot Q_{\max \text{ Zweig } m}(w, \Delta t) \quad (3.16b)$$

$$\Delta Q(w, \Delta t) = \frac{\delta Q_m(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \cdot Q_{\max \text{ Zweig } m}(w, \Delta t) \quad (3.16c)$$

Die beiden resultierenden Lösungen für jeden Berechnungszeitpunkt stellen die maximal abrufbare induktive bzw. kapazitive Blindleistung $Q_{\max \text{ Zweig } m}(w, \Delta t)$

¹⁰⁷Zu den Zweigelementen wird auch der HS/MS-Transformator gezählt.

¹⁰⁸Eine mit dem Blindleistungsabruf einhergehende mögliche Wirkleistungsänderung des Arbeitspunktes der Blindleistungsquelle wird vernachlässigt. Für Kondensatoren in der MS-Ebene betragen die Wirkverluste z. B. ca. 1 bis 10 $\frac{\text{W}}{\text{kVAr}}$, siehe [39] (Seite 14).

¹⁰⁹Mitternachtsformel: $x_{1/2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$

vom Netzanschlusspunkt der Blindleistungsquellen in Abhängigkeit der maximalen Leitungsauslastung dar. Da bei Betrachtung der Blindleistungsflüssen über Leitungen im Netzmodell unklar ist, ob es sich um einen kapazitiven oder induktiven Fluss handelt, wird über die Blindleistungssensitivität und die bestehende Vorzeichennomenklatur die Blindleistungsart definiert. Der Blindleistungsfluss auf Zweigelementen ist ebenfalls vorzeichenbehaftet. Z. B. bedeutet in PowerFactory ein positiver Blindleistungsfluss einen Leistungsfluss „in die Leitung hinein“. Eine positive Sensitivität besagt, dass der aktuelle Blindleistungsfluss betragsmäßig mit an der Quelle kapazitiveren Verhalten vergrößert wird. Das kleinere der beiden Berechnungsergebnisse stellt in diesem Fall den Blindleistungsgrenzwert dar, für den der Fluss verstärkt wird. Das zweite, d. h. der größere Wert, das Ergebnis, für den der aktuelle Blindleistungsfluss geschwächt wird. Somit gilt folgende Vorzeichenzuweisung:

Der kleinere der beiden Werte von $Q_{\max \text{ Zweig } m}(w, \Delta t)$ ist

- kapazitiv (negatives Vorzeichen), wenn $\frac{\delta Q_m}{\delta Q_{\text{Quelle}}} > 0$,
- induktiv (positives Vorzeichen), wenn $\frac{\delta Q_m}{\delta Q_{\text{Quelle}}} < 0$.

Der größere der beiden Werte von $Q_{\max \text{ Zweig } m}(w, \Delta t)$ ist

- induktiv (positives Vorzeichen), wenn $\frac{\delta Q_m}{\delta Q_{\text{Quelle}}} > 0$,
- kapazitiv (negatives Vorzeichen), wenn $\frac{\delta Q_m}{\delta Q_{\text{Quelle}}} < 0$.

In den Formeln 3.16b und 3.16c ist bislang noch nicht berücksichtigt, dass sich die Änderung der Leistungswerte am Arbeitspunkt $\frac{\delta P_m(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}}$ und $\frac{\delta Q_m(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}}$ aus drei Komponenten zusammensetzt, siehe Formel 3.17a und 3.17b. Zum einen ergibt sich eine direkte Änderung aufgrund des durch den Blindleistungsabruf hervorgerufenen zusätzlichen Blindleistungsfluss $\frac{\delta Q_{\text{Fluss } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}}$. Zum anderen entstehen Verluste an dem betrachteten Kantenelement $\frac{\delta Q_{V \text{ } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}}$ und an angrenzenden Kantenelementen $\frac{\delta Q_{V \text{ Netz } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}}$ (z. B. entlang eines MS-Stranges), die wiederum den Leistungsfluss beeinflussen. Analoges gilt für die Wirkleistungssensitivität.

$$\frac{\delta P_m(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} = \frac{\delta P_{\text{Fluss } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} + \frac{\delta P_{V \text{ } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} + \frac{\delta P_{V \text{ Netz } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \quad (3.17a)$$

$$\frac{\delta Q_m(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} = \frac{\delta Q_{\text{Fluss } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} + \frac{\delta Q_{V \text{ } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} + \frac{\delta Q_{V \text{ Netz } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \quad (3.17b)$$

Die Aufteilung des Leistungsflusses wird über die Impedanzen der Zweigelemente definiert und kann vereinfacht als konstant angenommen werden. Für die Berechnung der maximal abrufbaren Blindleistung $Q_{\max \text{ MS Zweig } m}(w, \Delta t)$ bleibt die arbeitspunktabhängige Verluständerung zu berücksichtigen, weshalb die Terme KF_{SePv} und KF_{SeQv} eingeführt werden. Diese Terme enthalten die Sensitivitätsänderung in $\frac{\%}{\text{MVA}_r}$, siehe Abschnitt 3.2.1.

Wie in Abbildung 3.26 skizziert, erhält man für die Leistungssensitivität eines Zweigelementes drei Werte je Leistungsart. Diese setzen sich aus der Sensitivität der Verluste (z. B. $\frac{\partial P_{V m}}{\partial Q_{\text{Quelle}}}$) des betrachteten Zweiges und den Sensitivitäten der Leistungsflüsse (z. B. $\frac{\partial P_{a m}}{\partial Q_{\text{Quelle}}}$) an den zwei Zweigenden a und b zusammen. Je nach Flussrichtung und Vorzeichen der Verlustsensitivität wird der Leistungsfluss erhöht oder abgeschwächt¹¹⁰. Alle drei Sensitivitätswerte enthalten bereits indirekt (über den aktuellen Arbeitspunkt) Verluste von Zweigelementen, so dass die konstante Flussaufteilung nicht direkt bestimmbar ist.

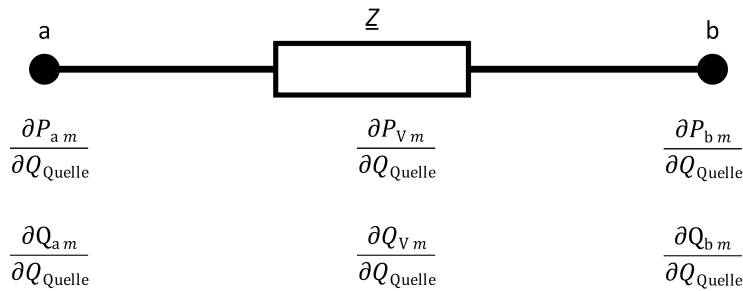


Abbildung 3.26: Schematische Darstellung eines Zweigelementes mit verfügbaren Sensitivitätswerten.

Zur näherungsweisen Bestimmung der Flusssensitivität wird der Leerlauf¹¹¹ des Netzes, d. h. alle Lasten und EZA sind deaktiviert, betrachtet und die Sensitivitätswerte an den Zweigenden $\frac{\partial P_{\text{Fluss LL } m \text{ a/b}}(w, \Delta t)}{\partial Q_{\text{Quelle}}}$ und $\frac{\partial Q_{\text{Fluss LL } m \text{ a/b}}(w, \Delta t)}{\partial Q_{\text{Quelle}}}$ bestimmt. Zur Ermittlung der Verlustsensitivität der angrenzenden Zweigelemente¹¹² werden am jeweiligen Berechnungspunkt die Differenz der aktuellen zur im Leerlauf ermittelten Sensitivität an den Zweigenden ermittelt und das Maximum für die weiteren Berechnungen verwendet, Formel 3.18c bis 3.18e bzw. 3.19c bis 3.19e. Dies führt ggf. zu einer Überschätzung der Arbeitspunktabhängigkeit, aber auf

¹¹⁰Die Wirkleistungsverluste einer Leitung verringern im Einspeisefall den Leistungsfluss in Richtung des „Slack-Knotens“. Im Starklastfall erhöhen sie ihn hingegen.

¹¹¹Der Leerlauf wird gewählt, da Blind- und Wirkverluste quadratisch von der Zweigauslastung abhängen und somit im Leerlauf der minimale Einfluss auf die Flussaufteilung besteht.

¹¹²Die Sensitivitäten der zweigeneigenen Wirk- und Blindverluste sind bekannt.

keinen Fall zu einer Unterschätzung. Da sich die Sensitivitätswerte auf den aktuellen Lastfluss beziehen, muss das Vorzeichen im Leerlauf und am Arbeitspunkt in die Berechnung einbezogen werden.

Die Zweigverlustsensitivität wird nach Formel 3.18b bzw. 3.19b hinsichtlich ihrer Arbeitspunktabhängigkeit korrigiert und ergibt in Summe mit der konstanten, d. h. vom Arbeitspunkt unabhängigen, Flusssensitivität die jeweilige Wirk- bzw. Blindleistungssensitivität eines Zweigelements, siehe Formel 3.18a bzw. 3.19a. Eingesetzt in Formel 3.16 resultiert ein Polynom 4. Grades, das über Standardverfahren lösbar ist.

$$\frac{\delta P_m(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} = \frac{\delta P_{V \text{ Sum } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} + \frac{\delta P_{\text{Fluss LL } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \quad (3.18a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta P_{V \text{ Sum } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} = & \left(\frac{\delta P_{V \text{ Netz } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \right. \\ & \left. + \frac{\delta P_{V m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \right) \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot K F_{\text{SePv}} \cdot Q_{\text{max MS Zweig } m}(w, \Delta t) \right) \end{aligned} \quad (3.18b)$$

$$\frac{\delta P_{V \text{ Netz } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} = \max\left(\left| \frac{\delta P_{V \text{ Netz } m a}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \right|, \left| \frac{\delta P_{V \text{ Netz } m b}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \right| \right) \quad (3.18c)$$

$$\frac{\delta P_{V \text{ Netz } m a/b}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} = s_{P m a/b} \cdot \frac{\delta P_{\text{Fluss AP } m a/b}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} - \frac{\delta P_{\text{Fluss LL } m a/b}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \quad (3.18d)$$

$$s_{P m a/b} = \text{sgn}(P_{\text{AP } m a/b}) \cdot \text{sgn}(P_{\text{LL } m a/b}) \quad (3.18e)$$

$$\frac{\delta Q_m(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} = \frac{\delta Q_{\text{V Sum } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} + \frac{\delta Q_{\text{Fluss LL } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \quad (3.19a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta Q_{\text{V Sum } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} = & \left(\frac{\delta Q_{\text{V Netz } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \right. \\ & \left. + \frac{\delta Q_{\text{V } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \right) \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot K F_{\text{SeQv}} \cdot Q_{\text{max MS Zweig } m}(w, \Delta t) \right) \end{aligned} \quad (3.19b)$$

$$\frac{\delta Q_{\text{V Netz } m}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} = \max\left(\left|\frac{\delta Q_{\text{V Netz } m a}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}}\right|, \left|\frac{\delta Q_{\text{V Netz } m b}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}}\right|\right) \quad (3.19c)$$

$$\frac{\delta Q_{\text{V Netz } m a/b}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} = s_{Q m a/b} \cdot \frac{\delta Q_{\text{Fluss AP } m a/b}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} - \frac{\delta Q_{\text{Fluss LL } m a/b}(w, \Delta t)}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \quad (3.19d)$$

$$s_{Q m a/b} = \text{sgn}(P_{\text{AP } m a/b}) \cdot \text{sgn}(P_{\text{LL } m a/b}) \quad (3.19e)$$

3.2.3 Diskussion der Ergebnisse der Netz-Sensitivitäts- und -Restriktionsanalyse hinsichtlich einer Blindleistungsbilanzoptimierung

Im Folgenden werden die bislang im Rahmen von Abschnitt 3.2 gewonnen Erkenntnisse im Kontext der zugrundeliegenden Aufgabenstellung diskutiert und anschließend ein Zwischenfazit gezogen.

3.2.3.1 Ergebnisse der Netz-Sensitivitäts- und -Restriktionsanalyse im Kontext der Aufgabenstellung

Im Fokus dieser Arbeit steht die Einhaltung von Grenzen der Blindleistungsbilanz einzelner MS-Netze. Vertragliche Regelungen zwischen Netzbetreibern definieren das zulässige Blindleistungsverhalten i. d. R. über $\cos\varphi$ -Werte. Typische Werte¹¹³, die im Folgenden hinsichtlich der Wirk-Blindleistungsbilanz von MS-Netzen diskutiert werden, sind ein $\cos\varphi$ kleiner oder gleich 0,95 für den I. und

¹¹³Bei den angeführten Grenzwerten handelt es sich um Erfahrungswerte, die im Zuge von Gesprächen mit Netzbetreibern gesammelt werden konnten.

II. Quadranten sowie ein $\cos\varphi$ kleiner oder gleich 0,925 für den III. Quadranten. Der IV. Quadrant ist unzulässig. Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, verursacht die Einspeisung von EZA eine horizontale Streckung des ursprünglichen Wirk-Blindleistungsverhaltens bei reiner Verbraucherstruktur und dadurch u. U. eine Verletzung der induktiven Blindleistungsgrenzen um den Wirkleistungsurprung. Mit zunehmender Verkabelung der Netze steigt deren Ladeleistung¹¹⁴, was zu einer Überschreitung der kapazitiven Grenzwerte im III. und IV. Quadranten führt. [37] diskutiert eine analoge Problematik zwischen HÖS- und HS-Ebene und empfiehlt anhand eines Beispiels die Einführung von Blindleistungsfreiräumen (konstantes Totband um Q gleich null). In Abbildung 3.27 werden die verschiedenen Blindleistungsgrenzen je Quadrant angedeutet. Darüber hinaus wird ein für MS-Netze möglicher Wirk-Blindleistungsarbeitsbereich skizziert¹¹⁵. Das primäre Ziel besteht heute somit in einer Kompensation von unzulässigen Blindleistungsarbeitspunkten in vertikaler Richtung hin zur Blindleistungsnulllinie.

Basierend auf den Ergebnissen von Abschnitt 2.3.2 und Anhang A.4, werden zur Abschätzung des maximalen Blindleistungsabrufs folgende „Eckpunkte“ der Wirk-Blindleistungsbilanz einer MS-Netzgruppe definiert:

1. Schwachlast: Liegt bei P gleich 0 und Q gleich -10 % aufgrund der kapazitiven Ladeleistung.
2. Starklast: Liegt bei P gleich 50 % und Q gleich +10 %. Der Punkt ergibt sich aufgrund der $(n - 1)$ -Auslegung von HS/MS-Transformatoren und dem bei hoher Auslastung gegen 0,2 strebenden $\tan\varphi$.
3. Starkrückspeisung: Liegt bei P gleich 100 % und Q gleich +20 % bzw. Q gleich +33 %. Dieser Punkt ergibt sich aufgrund der nicht notwendigen $(n - 1)$ -Auslegung von HS/MS-Transformatoren für den Einspeisefall und dem bei hoher Auslastung gegen 0,2 strebenden $\tan\varphi$ bzw. aufgrund der mit Spannungsblindleistungsregelung von EZA, die laut aktuellen TAB einen minimalen $\cos\varphi$ gleich 0,95 einstellen können müssen.

¹¹⁴Die Ladeleistung hängt von der Netzlänge, Verkabelungsgrad, Kabeltypen und Nennspannung ab. Eine Auswertung von 13 MS-Netzen aus dem Projekt [2] im Anhang A.4 zeigt, dass die maximal auftretende Ladeleistung heute einen Wert von ca. 10 % der Bemessungsleistung des HS/MS-Transformators nicht übersteigt und dabei selbst bei einem Verkabelungsgrad von 100 % lediglich in der Größenordnung von wenigen MVar liegt.

¹¹⁵Zur Erläuterung des Wirk-Blindleistungsverhaltens von MS-Netzen sei auf Abschnitt 2.3.2 und Anhang A.4 verwiesen.

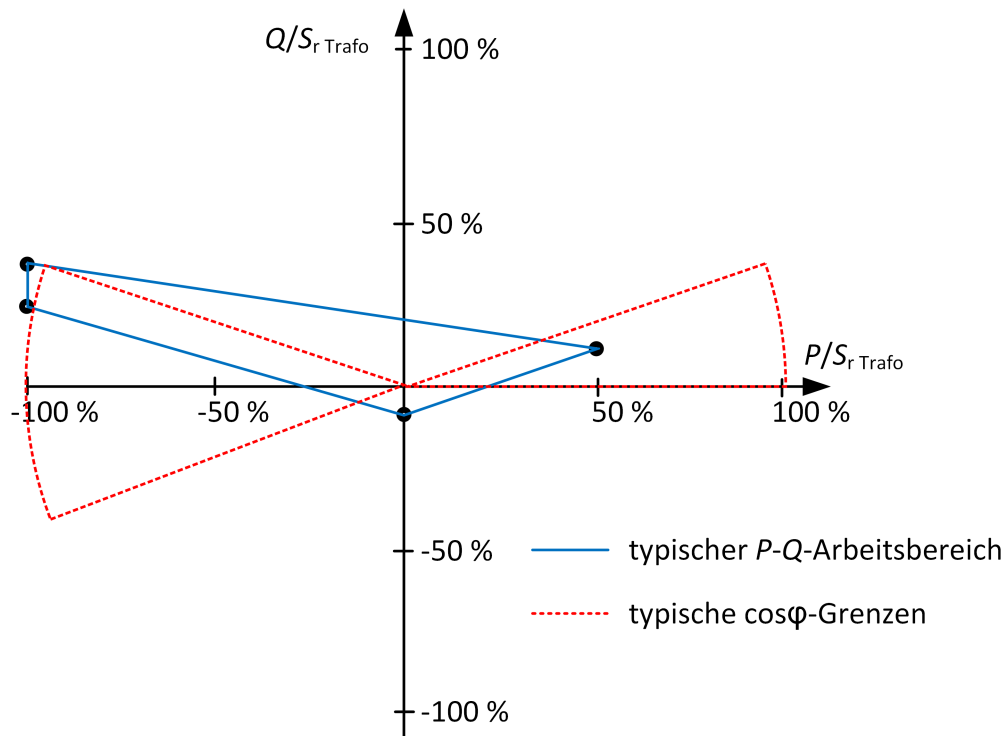


Abbildung 3.27: Darstellung typischer Blindleistungsgrenzen sowie des typischen Wirk-Blindleistungsarbeitsbereichs eines MS-Netzes im P - Q -Diagramm. P und Q sind auf die Nennscheinleistung $S_{r \text{ Trafo}}$ des HS/MS-Transformators normiert.

Der maximale induktive Kompensationsbedarf ergibt sich somit bei Schwachlast mit einem Wert von Q_{Bedarf} gleich +10 % bzw. bezogen auf einen 40-MVA-Transformator zu Q_{Bedarf} gleich +4 MVar. Der maximale kapazitive Bedarf ergibt sich bei heute typischen $\cos\varphi$ -Grenzen wiederum am Wirkleistungsnulldurchgang und kann durch Interpolation bei Starklast und Starkrückspeisung in Höhe von ca. 18 % bzw. Q_{Bedarf} gleich -7 MVar ermittelt werden.

Tabelle 3.2 zeigt eine Abschätzung der Arbeitspunktabhängigkeit der Spannungssensitivität bei induktiven Blindleistungsabruf im Bereich der Schwachlast auf Basis der in Abschnitt 3.2.1 ermittelten maximal möglichen Sensitivitätsänderung ΔSeU^* . Die resultierende Unsicherheit, um die sich die Sensitivität am Arbeitspunkt betragsmäßig erhöht, ist in Zeile fünf in $\frac{p. u.}{MVA_r}$ angegeben. Der Exponent 10^{-2} wurde bewusst gewählt, da so die Unsicherheit direkt in Bezug zur zulässigen Spannungsanhebung bzw. zum zulässigen Spannungsfall in der Größenordnung „Prozentpunkt“¹¹⁶ diskutiert werden kann. Der Einfluss am HS/MS-Transformator kann in guter Näherung vernachlässigt werden. Berücksichtigt man,

¹¹⁶Ein Prozentpunkt entspricht 0,01 p. u.

dass die freien Spannungsbänder i. d. R. nur wenige Prozentpunkte betragen, so ist der Einfluss auf die Sensitivität der MS-Leitung, der in der Größenordnung von einem halben bis mehreren Zehntel Prozentpunkten je MVar liegt, nicht zu vernachlässigen. Vermindert wird der Einfluss, wenn der Blindleistungsabruf verteilt über mehrere MS-Leitungen oder von Netzknoten mit einer geringeren Impedanz als der veranschlagten 20 km langen Leitungen erfolgt. Der kapazitive Abruf wird nicht diskutiert, da in Abschnitt 3.2.1 gezeigt wurde, dass ein kapazitiver Blindleistungsabruf immer eine Reduzierung der Sensitivität zur Folge hat und bezogen auf heute typische Arbeitspunkte der Einfluss auf die Spannungshaltung bei Verwendung der am Arbeitspunkt ermittelten Spannungssensitivität nicht unterschätzt wird, da die Sensitivität nur geringfügig abnimmt.

Tabelle 3.2: Abschätzung der Änderung der Spannungssensitivität bei einem induktiven Blindleistungsabruf von ΔQ gleich 4 MVar am Arbeitspunkt (AP) Schwachlast ($Q = -10\%$, $P = 0$).

Parameter	Einheit	HS/MS-Ebene	MS-Freileitung	MS-Kabel
$\Delta SeU^* = \max(\frac{\Delta SeU_{rel}}{\Delta Q})$	$\frac{\%}{\text{MVar}}$	1,3	9,0	5,0
$\Delta SeU^{**} = \Delta SeU^* \cdot \Delta Q$	%	2,6	18,0	10,0
SeU_{AP}	$\frac{\text{p. u.}}{\text{MVar}}$	$-0,03 \cdot 10^{-2}$	$-1,8 \cdot 10^{-2}$	$-0,5 \cdot 10^{-2}$
$SeU_{AP} \cdot \Delta SeU^{**}$	$\frac{\text{p. u.}}{\text{MVar}}$	$-0,001 \cdot 10^{-2}$	$-0,330 \cdot 10^{-2}$	$-0,055 \cdot 10^{-2}$

Aus Sicht der HS-Ebene wirkt sich die Verringerung der kapazitiven Ladeleistung positiv aus, da hierdurch der bei Leerlauf bzw. Schwachlast auftretende spannungsanhebende Ferranti-Effekt reduziert wird. Auch eine mögliche Reduzierung des induktiven Bedarfs bei Starklast stützt die Spannung. Die Kompensation des induktiven Bedarfs bei Starkrückspeisung führt hingegen zu einem Spannungsanstieg in der HS-Ebene, der zu berücksichtigen ist. Die Spannungssensitivität für die in Abschnitt 3.2.1 betrachtete HS-Leitung bei Schwachlast liegt bei $-0,1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{p. u.}}{\text{MVar}}$ und würde bei einem induktiven Blindleistungsabruf von 4 MVar zu einer Spannungsabsenkung von ca. $0,4 \cdot 10^{-2}$ p. u. führen. Analog stellt sich eine Spannungsanhebung in Höhe von ca. $0,7 \cdot 10^{-2}$ p. u. bei Abruf von kapazitiver Blindleistung mit einem Wert von 7 MVar ein. In Bezug auf die Stabilitätsgrenzen der Spannungshaltung in der HS-Ebene sind primär die Arbeitspunkte Starklast und Starkrückspeisung zu betrachten. In beiden Fäl-

len wird kapazitive Blindleistung mit spannungsanhebender und damit stabilisierender Wirkung abgerufen. Aus diesem Grund wird bei der Entwicklung des Algorithmus zu Koordination des Blindleistungsabrufs aus mehreren Blindleistungsquellen im Abschnitt 3.3 kein Blindleistungsgrenzwert zur Abbildung von Stabilitätsgrenzen der HS-Ebene eingeführt.

Unter den anfänglich genannten Voraussetzungen (Blindleistungsabruf zur Kompensation der Blindleistungsbilanz) kann für den HS/MS-Transformator eine Reduzierung der Verluste und Betriebsmittelbelastung konstatiert werden. Bei den MS-Leitungen ist dies nicht pauschal möglich, da z. B. ein Blindleistungsabruf bei Schwachlast die Betriebsmittelbelastung und damit die Verluste erhöhen kann.

3.2.3.2 Zwischenfazit

Die Betrachtung des Anwendungsfalls zeigt, dass aus heutiger Sicht sowohl mit induktiven als auch kapazitiven Blindleistungsabrufen von Blindleistungsquellen der MS-Ebene zum Ausgleich der Blindleistungsbilanz eines MS-Netzes zu rechnen ist. Aus Sicht der Netz-Sensitivitätsanalyse ist hierbei vor allem die Arbeitspunktabhängigkeit der Spannungssensitivität zu berücksichtigen, um bei induktiven Blindleistungsabrufen eine Unterschätzung der Spannungsänderung zu vermeiden. Eine Abschätzung der Sensitivitätsänderung ist dabei mit Hilfe der in Abschnitt 3.2.1 ermittelten Korrekturfaktoren in $\frac{\%}{\text{MVar}}$ möglich. Die ermittelten Werte stammen aus einer Worst-Case-Betrachtung (siehe Modellbeschreibung in Abschnitt 3.2.1.1). Durch Einbeziehung der Sensitivität am Arbeitspunkt (prozentuale Änderung dieser) und Normierung (je MVar) auf den Blindleistungsabruf kann dennoch eine sichere und verhältnismäßige Bewertung aller Netzknoten erfolgen¹¹⁷.

Die entwickelte Netz-Restriktionsanalyse berücksichtigt die Randbedingungen der Spannungshaltung und Betriebsmittelauslastung, jedoch kann immer nur eine Blindleistungsquelle unabhängig von anderen betrachtet werden. Soll Blindleistung aus mehreren Quellen abgerufen werden, müsste eine Reihenfolgen (z. B. über Heuristik) definiert werden, nach der Blindleistungsabruf sukzessive bewertet wird. Da hierbei nicht zwangsläufig ein Optimum gefunden wird, wird in

¹¹⁷Knoten mit geringem oder weitem elektrischen Abstand zum HS/MS-Transformator erfahren die gleiche prozentuale Sensitivitätsänderung je MVar, jedoch fällt die absolute Spannungsänderung in $\frac{\text{p.u.}}{\text{MVar}}$ bei elektrisch nah am Umspannwerk liegenden Knoten deutlich geringer aus, da die Höhe der Sensitivität am Ausgangsarbeitspunkt berücksichtigt wird.

Abschnitt 3.3 ein Algorithmus zur Koordination des Blindleistungsabrufs aus mehreren Blindleistungsquellen entwickelt, der auf den Grundsätzen der Netz-Sensitivitäts- und -Restriktionsanalyse basiert, jedoch durch Anwendung der linearen Optimierung auf mehrere Blindleistungsquellen gleichzeitig anwendbar ist und neben den Netzrestriktionen das verfügbare Potenzial je Blindleistungsquelle und den Blindleistungsbedarf berücksichtigt.

3.3 Entwicklung eines Algorithmus zur Koordination eines dezentralen Blindleistungsabrufs aus mehreren Blindleistungsquellen

Basierend auf den Ergebnissen der Netz-Sensitivitäts- und -Restriktionsanalyse wird im Folgenden ein Algorithmus beschrieben, der den gleichzeitigen Blindleistungsabruf aus mehreren Blindleistungsquellen mit Anschlusspunkt in der MS-Ebene anhand von netzplanerisch ermittelten Steuerparametern ermöglicht. Abschnitt 3.3.1 erläutert hierzu zunächst die allgemeine Funktionsweise. Abschnitt 3.3.2, 3.3.3 und 3.5.1 enthalten notwendige Festlegungen, bevor in Abschnitt 3.3.4 die technische Umsetzung des Verfahrens beschrieben wird.

3.3.1 Funktionsweise des Koordinationsalgorithmus

Bei einem dezentralen Blindleistungsabruf aus mehreren Quellen stellt sich die Frage, wie der Blindleistungsabruf idealerweise zu verteilen ist. Zu berücksichtigen sind hierbei die Spannungs- und Belastungsgrenzen an den Knoten- und Zweigelementen sowie das Potenzial der Blindleistungsquellen. Es stellt sich somit die Aufgabe, den Blindleistungsabruf in geeigneter Weise auf mehrere Blindleistungsquellen so zu verteilen („zu koordinieren“), dass gegebene Randbedingungen eingehalten werden und der Blindleistungsbedarf minimiert wird. Es handelt sich folglich um ein klassisches Optimierungsproblem.

Im Weiteren wird ein Algorithmus entwickelt, der Steuerparameter ermittelt, über die ein Blindleistungsabruf aus mehreren Blindleistungsquellen der MS-Ebene durchgeführt werden kann, ohne Netzrestriktionen zu verletzen und ohne dafür zusätzliche Messtechnik in der MS-Ebene zu installieren. Ziel hierbei ist es,

die Blindleistungsbilanz des MS-Netzes innerhalb definierter Grenzen zu halten bzw. hierfür Blindleistungsquellen im Rahmen der Netzplanung zu identifizieren, die einen signifikanten Beitrag leisten können. Eine gleichzeitige Optimierung der Spannungshaltung oder Betriebsmittelbelastung ist im Rahmen dieser Arbeit nicht abgebildet.

3.3.1.1 Allgemeine Funktionsweise des Koordinationsalgorithmus

Ergebnisse des Algorithmus sind Gewichtungsfaktoren $g_{Q,q}$ für jede der q zu berücksichtigenden Blindleistungsquellen sowie eine maximal abrufbare Blindleistung. Beide werden unter dem Begriff Steuerparameter¹¹⁸ zusammengefasst und gedanklich von der Netzplanung abgeleitet. Im Rahmen der Netzführung wird mittels dieser, der nach Formel 3.20a ermittelte Blindleistungsbedarf $Q_{\text{Bedarf}}(w, \Delta t)$ nach Gleichung 3.20b skaliert und so der Beitrag einer Blindleistungsquelle $Q_{\text{Abruf } q}(w, \Delta t)$ berechnet¹¹⁹. Die Gewichtungsfaktoren werden über einen Optimierungsalgorithmus für einzelne Teilbereiche (e Eingriffsklassen) der Wirk-Blindleistungsbilanz der Netzgruppe berechnet. Wichtige Einflussgrößen sind hierbei u. a. das Blindleistungspotenzial der Blindleistungsquelle und der Blindleistungsbedarf der Netzgruppe, was eine Weiterentwicklung gegenüber der Netz-Sensitivitäts- und -Restriktionsanalyse darstellt. Die Summe über alle Gewichtungsfaktoren ist eins, da diese den relativen Anteil einer Quelle bezogen auf den gesamten Blindleistungsabruf repräsentieren. Für jede Eingriffsklasse wird ein Blindleistungspotenzialdefizit $Q_{\text{Pot Defizit } e}$ nach Formel 3.20d ausgegeben. Ist dieses größer null, bedeutet dies, dass das bestehende Blindleistungspotenzial¹²⁰ der Blindleistungsquellen nicht ausreicht, um den Bedarf zu decken, oder dass der Potenzialabruf durch Strom- oder Spannungsgrenzen limitiert wird. Durch genauere Auswertung der betroffenen Eingriffsklasse können limitierende Knoten- und/oder Zweigelemente bzw. geeignete Standorte für Blindleistungsquellen iden-

¹¹⁸ Steuerparameter sind somit gleichzusetzen mit ein fester Verteilung und Limitierung eines Blindleistungsabrufs aus mehreren Blindleistungsquellen.

¹¹⁹ Der Blindleistungsabruf im Rahmen der Netzführung kann auf einem kontinuierlichen oder zeitdiskreten Soll-Ist-Vergleich basieren. Aufgrund der Messwernerfassung, Messwertverarbeitung und Einregelzeitkonstanten ist letzteres wahrscheinlicher, weshalb die folgenden Formeln als diskrete zeitabhängige Größen mit äquidistanter Schrittweite als Funktion von w und Δt ausgedrückt werden.

¹²⁰ Als Wert des Blindleistungspotenzials einer Blindleistungsquelle in einer Eingriffsklasse wird in dieser Arbeit der Mittelwert aller Potenziale der Arbeitspunkte innerhalb einer Eingriffsklasse verwendet, um den typischen Potenzialwert und darüber den geeignetsten Gewichtungsfaktor abzubilden. Um einen gesicherten Blindleistungsabruf zu bewerten, müsste der Minimalwert verwendet werden.

tifiziert und so ein Netzausbau effizienter gestaltet werden, was im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter ausgeführt wird. Da die Gewichtungsfaktoren im Rahmen des Algorithmus über Worst-Case-Szenarien je Eingriffsklasse (siehe Abschnitt 3.3.2) für einen definierten maximalen Blindleistungsabruf ermittelt werden, muss bei Werten, die diesen übersteigen, der Blindleistungsbedarf limitiert werden. Die entsprechende Bedingung zeigt Formel 3.20e. Wird diese häufig verletzt, ist dies ein Indiz dafür, dass sich die Netzverhältnisse geändert haben und eine Neuberechnung der Gewichtungsfaktoren vorzunehmen ist.

$$Q_{\text{Bedarf}}(w, \Delta t) = Q_{\text{Soll}} - Q_{\text{Ist}}(w, \Delta t) \quad (3.20a)$$

$$Q_{\text{Abruf } q}(w, \Delta t) = -Q_{\text{Bedarf}}(w, \Delta t) \cdot g_{Q \ q \ e} \quad (3.20b)$$

$$\sum_{q=1}^{q_{\max}} \frac{Q_{\text{Abruf } q \ e}}{\sum_{q=1}^{q_{\max}} Q_{\text{Abruf } q \ e}} = \sum_{q=1}^{q_{\max}} g_{Q \ q \ e} = 1 \quad (3.20c)$$

$$Q_{\text{Pot Defizit } e} = |Q_{\text{Bedarf } e}| - |Q_{\text{Pot } e}| \quad (3.20d)$$

$$|Q_{\text{Bedarf}}(w, \Delta t)| \leq Q_{\text{Bedarf max } e} = \min(\max(|Q_{\text{Bedarf } e}|), |Q_{\text{Abruf max } e}|) \quad (3.20e)$$

3.3.1.2 Phasen des Koordinationsalgorithmus

Das Verfahren zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren gliedert sich in zwei aufeinander aufbauende Phasen¹²¹, die in Abbildung 3.28 visualisiert sind:

- In Phase 1, der *Systemanalyse*, werden anhand der Wirk-Blindleistungsbilanz des MS-Netzes und der geltenden Blindleistungsgrenzen, e Eingriffsklassen und die darin enthaltenen Berechnungszeitpunkte ermittelt. Eingriffsklassen sind einzelne zusammenhängende Flächen der Wirk-Blindleistungsbilanz, für die eine feste Kombination von Gewichtungsfaktoren $g_{Q \ q \ e}$ bestimmt wird (siehe Abschnitt 3.3.2). Mit Hilfe der Netzsimulation können die Ursachen für die Grenzwertverletzung der Blindleistungsbilanz untersucht und ggf. Maßnahmen definiert werden, um diese zu reduzieren oder sogar ganz zu vermeiden (z. B. Deaktivierung von aktiven $\cos\varphi(P)$ -Regelungen, Erhöhung von Kompensationsvorgaben für industrielle Verbraucher in TAB). In diesem Schritt wird auch geprüft, ob eine Wechselwir-

¹²¹Für das Verfahren wird davon ausgegangen, dass ein geeignetes Netzmodell für Netzsimulationen vorhanden ist. Hinweise zur Erstellung eines solchen Modells können [2, 62, 63] entnommen werden.

kung mit EZA mit aktiver Spannungsblindleistungsregelung besteht (siehe Abschnitt 3.5.4).

- In der 2. Phase, der *Abrufverteilung*, werden die Eingangsdaten für einen Optimierungsalgorithmus vorbereitet, über den die Steuerparameter für einen Blindleistungsabruf ermittelt werden. Hierbei werden nicht die tatsächlichen Berechnungspunkte einer Eingriffsklasse und deren Parameter (z. B. Spannungsfreiräume an Knotenelementen) analysiert, sondern ein Worst-Case-Szenario für jede Eingriffsklasse. Abschließend ermittelt der Optimierungsalgorithmus (siehe Abschnitt 3.3.4) die Gewichtungsfaktoren $g_{Q q e}$ für die Verteilung des Blindleistungsabrufs auf jede der q Blindleistungsquellen und die maximal abrufbare Blindleistung $Q_{\text{Abruf max } e}$ je Eingriffsklasse e .

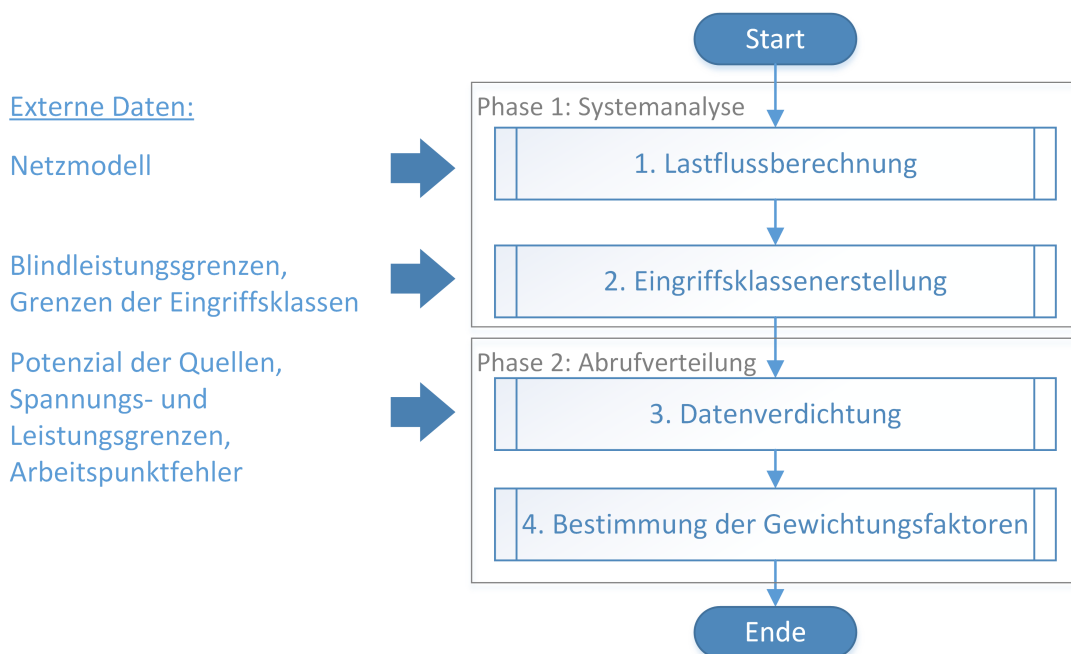


Abbildung 3.28: Phasen des Koordinationsalgorithmus.

3.3.2 Definition von Eingriffsklassen

Die Ermittlung der Gewichtungsfaktoren erfolgt im Rahmen des Algorithmus basierend auf einem Worst-Case-Szenario je Eingriffsklasse, mit dem Ziel einen „gesicherten“ Blindleistungsabruf (in Höhe und betragsmäßiger Aufteilung auf die verfügbaren Blindleistungsquellen) zu definieren. Die resultierenden Werte der Gewichtungsfaktoren hängen dabei primär von der Höhe

- des nutzbaren Blindleistungspotenzial je Quelle,
- des Blindleistungsbedarfs und
- der Spannungs- und Leistungsfreiräume der Knoten- und Zweigelemente ab.

Diese Parameter korrelieren nicht zwangsläufig und Arbeitspunkte im Wirk-Blindleistungsdigramm mit gleichen P - und Q -Werten können unterschiedliche Kombinationen dieser Faktoren aufweisen. Für das Steuerungsverfahren wird in dieser Arbeit ein festes Raster¹²² bzw. „Gitternetz“ verwendet, über das die Wirk- und Blindleistungsgrenzen einzelner Eingriffsklassen definiert werden. Die Grenzen der Eingriffsklassen sollten dabei so gewählt werden, dass ähnliche Arbeitspunkte zusammengefasst werden und gleichzeitig die Änderung der bereits aufgelisteten Parameter nicht zu groß innerhalb der Eingriffsklasse ist. Eine exemplarische Darstellung der Eingriffsklassen („blaue Rechtecke“) für das Wirk-Blindleistungsverhalten eines MS-Netzes zeigt Abbildung 3.29.

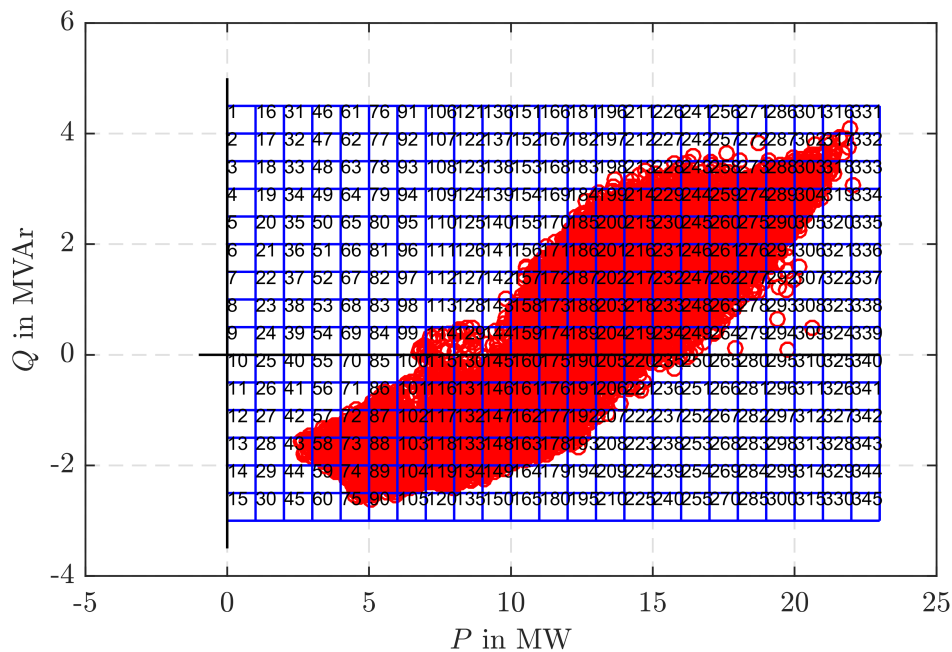


Abbildung 3.29: Wirk-Blindleistungsverhalten eines MS-Netzes mit 345 eingezeichneten Eingriffsklasse (P -Schrittweite = 1 MW, Q -Schrittweite = 0,5 MVar). Datenbasis bilden Simulationswerte in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres.

¹²²Die Grenzen der Eingriffsklassen könnten auch nicht äquidistante Werte annehmen, wenn hierdurch sinnvoll zusammenfassbare Arbeitspunkte je Eingriffsklasse definiert werden oder wenn die Volatilität von Arbeitspunkten ein gleichmäßiges „Gitternetz“ nicht erlaubt (siehe auch Diskussion in Abschnitt 3.5.6).

In der MS-Ebene wird die übertragbare Leistung von Zweigelementen bei heute typischen Spannungsgrenzen schon bei kurzen Leitungslängen durch die Spannungsbandgrenzen limitiert, was im Anhang A.6 Abbildung A.5 dargestellt wird. Aus diesem Grund wird zur Definition des Abstands der einzelnen Begrenzungslinien des Gitternetzes zunächst die Spannungssensitivität betrachtet. Das Maximum der Blindleistungssensitivität¹²³ der in Abschnitt 3.2.1 betrachteten 20 km langen Freileitung liegt bei ca. $-3,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{p.u.}}{\%}$ bzw. des Kabels bei $-8 \cdot 10^{-4} \frac{\text{p.u.}}{\%}$ über alle zulässigen Arbeitspunkte, was einem maximalen Einfluss in der Größenordnung von Prozentpunkten je MVar bedeutet¹²⁴. Da die freien Spannungsbänder i. d. R. nur wenige Prozentpunkte betragen und einzelne MS-Stränge in der Praxis durchaus eine Länge von 20 km erreichen bzw. auch überschreiten können, wird in dieser Arbeit zunächst eine Schrittweite von 0,5 MVar bzw. MW gewählt, um das Potenzial der Blindleistungsquellen bestmöglich ausnutzen zu können. Je größer Eingriffsklassen definiert werden (im Extremfall einzelne Worst-Case-Auslegungsfälle), desto sicherer ist der ermittelte Blindleistungsabruf, allerdings sinkt dabei auch die Potenzialausnutzung.

Ein weiterer Anhaltswert zur Definition der Eingriffsklassengrenzen ist die Höhe der Wirk- ΔP und Blindleistungsänderung ΔQ zwischen zwei zeitlich direkt aufeinanderfolgenden Arbeitspunkten. Abbildung 3.30 zeigt diese für die Beispielnetzgruppe Stadt_Industrie, die in Kapitel 4 analysiert wird. Die Blindleistungsänderung ist deutlich geringer als die Wirkleistungsänderung (ca. halb so groß). Die Mehrzahl der Wirkleistungsänderung liegt in einem Bereich von plus oder minus einem MW, weshalb für diese Netzgruppe die Schrittweite der Wirkleistungsgrenzen zu 1 MW angehoben wird. Hohe Wirkleistungssprünge (-8 bis 9 MW) treten auf, kommen allerdings sehr selten vor. Sie stammen von kurzzeitigen Leistungseinbrüchen (ein 15-Minutenwert, der z. B. von 18 MW auf ca. 10 MW abfällt), die z. B. durch Schalthandlungen¹²⁵ im Netz verursacht werden.

Zu berücksichtigen ist, dass beim späteren Blindleistungsabruf die Spannungs- und Stromverhältnisse der MS-Leitungen und -Knoten unbekannt sind und sich auch im Vergleich zur ausgewerteten Datenbasis ändern können. Um mehrere Eingriffsklassen bilden zu können, wird folglich gefordert, dass die betrachtete

¹²³Die Wirkleistungssensitivität ist deutlich geringer ausgeprägt, da die Netzbetriebsmittel auf einen Wirkleistungstransport optimiert sind.

¹²⁴Selbst bei Einschränkung der betrachteten Arbeitspunkte auf P bis maximal 50 % der Nennleistung und einem heute typischen Blindleistungsverhalten, bleibt diese Aussage bestehen.

¹²⁵Gravierende Eingriffe (z. B. Umschaltung ganzer Netzgruppen) wurden im Datensatz bereinigt, kleinere Eingriffe wurden belassen.

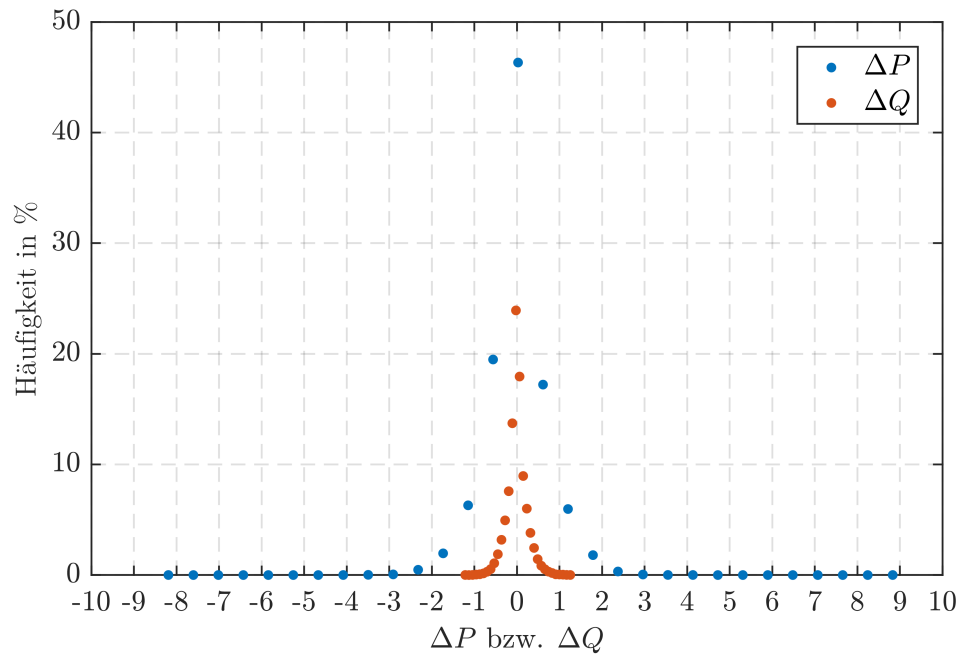


Abbildung 3.30: Häufigkeit der Wirk- und Blindleistungsänderung zweier aufeinander folgenden 15-Minuten-Mittelwerte in Abhängigkeit ihrer Höhe. Datenbasis des Diagramms sind die Simulationswerte der Beispielnetzgruppe Stadt_Industrie (15-Minuten-Mittelwerte des Jahres 2015).

Netzgruppe ein wiederkehrendes bzw. prognostizierbares (z. B. über geeignete Modelle für EZA und Lasten) Verhalten in Bezug auf das Wirk-Blindleistungsverhalten an der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators und Strom- und Spannungsverhältnissen in der MS-Ebene aufweist. Besonders gut wird diese Bedingung i. d. R. in lastgeprägten Netzen erfüllt (siehe auch Anhang A.4). Einspeisung aus PV-Anlagen und Biomasseanlagen sind ebenfalls noch ausreichend genau abbildbar. Windenergieanlagen mit fluktuierender Einspeisung wirken sich hingegen negativ aus. Umso volatiler das Verhalten des Netzes ist, umso größer müssen die Eingriffsklassen gewählt werden (im Extremfall eine Klasse über alle Arbeitspunkte).

Die Definition von Eingriffsklassen könnte neben den Werten der Wirk- und Blindleistungsbilanz der Netzgruppe um weitere Parameter wie z. B. Jahreszeit oder Wetterlagen ergänzt werden, um Blindleistung noch differenziert abzurufen. Dies erfordert allerdings eine ausreichend große Datenbasis (z. B. mehrere Jahre) und macht das Verfahren anfälliger für sich ändernde Netzverhältnisse.

3.3.3 Definition von Worst-Case-Szenarien

In Anlehnung an die heute übliche Auslegungspraxis von Stromnetzen¹²⁶ werden im Rahmen des Koordinationsalgorithmus Worst-Case-Szenarien¹²⁷ bei der Bestimmung der Gewichtungsfaktoren verwendet. Um unterschiedliche Netzsituationen abbilden und somit Blindleistungspotenziale differenzierter nutzen zu können, wird je Eingriffsklasse ein Worst-Case-Szenario erstellt. Als Worst-Case-Szenario wird eine Kombination von Spannungs-, Leistungs- und Sensitivitätswerten verstanden, bei der die maximal abrufbare Blindleistung maximal eingeschränkt wird (z. B. werden bei kapazitiven Abruf maximale Spannungsniveaus von Netzknoten mit betragsmäßig maximalen Spannungssensitivitäten kombiniert). Da kapazitive und induktive Abrufe unterschiedlichen Einfluss auf die Spannungshaltung haben, gibt es je Eingriffsklasse und Blindleistungsart ein Worst-Case-Szenario, d. h. eine unterschiedliche Berechnungsweise (siehe z. B. Formel 3.25a bis 3.25h in Abschnitt 3.3.4.2). Datenbasis für die Parameterbildung sind alle Simulationsergebnisse von Berechnungspunkten innerhalb einer Eingriffsklasse. Der zeitliche Bezug der Parameter untereinander geht dabei verloren, wodurch das resultierende Szenario keinem „real“ aufgetretenen Arbeitspunkt mehr entspricht, sondern einem „fiktiven“ Worst-Case-Fall. U. a. werden folgende Worst-Case-Parameter je Eingriffsklasse verwendet:

- maximale und minimale Spannung je Knoten
- maximaler Blindleistungsbedarf
- Maximum der Beträge der Spannungs- und Leistungssensitivitäten
- Maxima der Wirk- und Blindleistungsflüsse über Zweigelemente

Erstellt werden die Parameter in Phase 2 des Verfahrens im Rahmen der Datenverdichtung (siehe Abschnitt 3.3.1.2). Bei induktiven Blindleistungsabrufen erfolgt zudem eine Korrektur der Sensitivitätswerte (siehe Abschnitt 3.2.2.1), die wiederum auf Worst-Case-Annahmen basiert. Die genaue Verwendung der Worst-Case-Parameter im Koordinationsalgorithmus wird in Abschnitt 3.3.4 erläutert.

¹²⁶Primär ist hierbei die Einhaltung von Strom- und Spannungsgrenzen gemeint.

¹²⁷Alternativ wäre auch die Verwendung anderer Ansätze wie z. B. die Nutzung von Zustandsschätzern möglich. Solange die MS-Ebene nur eine geringe Durchdringung mit Messtechnik aufweist müssen dennoch Sicherheitsmargen eingeplant werden, weshalb die Verwendung von Worst-Case-Szenarien zum heutigen Zeitpunkt am geeignetsten erscheint.

3.3.4 Umsetzung des Algorithmus zur Abrufkoordination

Der Koordinationsalgorithmus berechnet mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus die gesuchten Gewichtungsfaktoren zur Aufteilung des Blindleistungsabrufs auf verschiedene verfügbare Blindleistungsquellen je Eingriffsklasse. Die benötigten Eingangsdaten werden im Vorfeld so aufbereitet, dass je Eingriffsklasse ein Worst-Case-Szenario entsteht. Die zu lösende Aufgabenstellung wird in Form eines linearen Optimierungsproblems beschrieben, da dieses eine effiziente Umsetzung ermöglicht (Programmieraufwand und Rechenzeit), leicht an Änderungen der Netzstruktur anpassbar ist (z. B. Ergänzung von Quellen oder Netzknoten) sowie eine „Optimalitätsgarantie¹²⁸“ bietet. Dies setzt voraus, dass sowohl die Zielfunktion $\max(f(\vec{x}))$, als auch die Randbedingungen $\vec{c}(\vec{x})$ und $\vec{h}(\vec{x})$ linear von den l Entscheidungsvariablen \vec{x} abhängig sind. Der mögliche Lösungsraum χ wird über k Gleichungs- und u Ungleichungsnebenbedingungen ($\vec{c}(\vec{x})$ und $\vec{h}(\vec{x})$ in Formel 3.21) aufgespannt. Als Grundvoraussetzung für ein Optimierungsproblem muss $k < l$ gelten, da andernfalls das zu lösende Gleichungssystem direkt gelöst ($k = l$) oder überbestimmt wäre ($k > l$).

Die Umsetzung des Lösungsverfahrens erfolgt in MATLAB 2016b, das notwendige Eingangsdaten über das Lastflussberechnungsprogramm PowerFactory 2017 SP3 bezieht. Im Weiteren bezieht sich die Vorzeichennomenklatur der Spannungssensitivität auf die von PowerFactory, d. h. eine positive Spannungssensitivität sagt aus, dass mit zunehmend kapazitiven Verhalten die Spannung steigt. Die Werte der Blindleistung werden nach wie vor im Verbrauchszählpeilsystem angegeben.

Im Folgenden werden die Zielfunktionen, die Randbedingungen und der Ablauf der Optimierung anhand eines Flussdiagramms näher erläutert.

3.3.4.1 Zielfunktion

Über den Verteilungsalgorithmus wird der ermittelte Blindleistungsbedarf auf die einzelnen Blindleistungsquellen aufgeteilt, so dass dieser über einen Blindleistungsabruf möglichst gut gedeckt wird. Zur Erreichung dieser Zielsetzung wird die Zielfunktion nach Formel 3.21 beschrieben¹²⁹. Es handelt sich um ein Maximierungsproblem, über das zunächst das maximal mögliche Blindleistungspotenzial

¹²⁸Bei der linearen Optimierung treten keine lokalen Extrema auf.

¹²⁹Zum einfacheren Verständnis werden im Folgenden die Maximalwerte der Laufvariablen der Summen nicht über eine separate Variable, sondern über den Index „max“ ausgedrückt.

aus den q Blindleistungsquellen je Eingriffsklasse e abgerufen werden soll. Eine Überkompensation wird durch die spätere Einführung einer Ungleichungsnebenbedingung verhindert. Im Rahmen des Koordinationsalgorithmus wird nur ein „reiner“ Blindleistungsabruf, d. h. nur ein kapazitiver oder induktiver Abruf, umgesetzt. Dies ist notwendig, da es sonst zu unnötigen Kompensationseffekten des Blindleistungsabrufs aus verschiedenen Blindleistungsquellen kommen könnte und die gewählte Worst-Case-Betrachtung keinen gemischten Blindleistungsabruf erlaubt (siehe Abschnitt 3.3.3). Die Betragsstriche ermöglichen eine unveränderte Zielfunktion für den Abruf von kapazitiven und induktiven Potenzial. Der richtige Zugriff auf das entsprechende Potenzial wird über eine Fallunterscheidung anhand des Vorzeichens des Blindleistungsbedarfs sichergestellt, was näher bei der späteren Beschreibung des Ablaufs erläutert wird.

$$\max(|\vec{Q}_{\text{Pot } q \ e}| \cdot \vec{x}_e) = \max\left(\sum_{q=1}^{q_{\max}} |Q_{\text{Pot } q \ e}| \cdot x_{q \ e}\right) \quad (3.21)$$

$$\text{mit } \vec{x}_e \in \chi, \text{ wobei } \chi = \{\vec{x} \in \mathbb{R}^l \mid \vec{c}(\vec{x}) = \vec{0}; \vec{h}(\vec{x}) \leq \vec{0}\}$$

Die l Entscheidungsvariablen $x_{q \ e}$ stellen auf das Minimum von Blindleistungsbedarf und umsetzbaren Blindleistungsabruf¹³⁰ normiert (siehe Formel 3.22a) die gesuchten Gewichtungsfaktoren $g_{Q \ q \ e}$ und die Summe des Potenzialabrufs $\sum_{q=1}^{q_{\max}} |Q_{\text{Pot } q \ e}| \cdot x_{q \ e}$ die maximal abrufbare Blindleistung dar.

$$g_{Q \ q \ e} = \frac{x_{q \ e}}{|Q_{\text{Bedarf max } e}|} \quad (3.22a)$$

$$Q_{\text{Bedarf max } e} = \min(\max(|Q_{\text{Bedarf } e}|), |Q_{\text{Abruf max } e}|) \quad (3.22b)$$

3.3.4.2 Randbedingungen

Im Folgenden werden die Randbedingungen des Verfahrens erläutert, die allesamt Ungleichungsnebenbedingungen sind.

¹³⁰Eine Limitierung des Q_{Bedarfs} und damit indirekt des Blindleistungsabrufs kann u. U. aufgrund eines fehlenden Blindleistungspotenzials oder durch die Begrenzung durch Netzrestriktionen erfolgen.

Die erste Bedingung, Formel 3.23, verhindert eine Überkompensation des Blindleistungsbedarfs, indem die Summe des abgerufenen Blindleistungspotenzials kleiner gleich dem Wert des Blindleistungsbedarfs ist.

$$\sum_{q=1}^{q_{\max}} |Q_{\text{Pot } q \text{ e}}| \cdot x_{q \text{ e}} \leq |Q_{\text{Bedarf max e}}| \quad (3.23)$$

Da die Entscheidungsvariablen alle Werte zwischen 0 und 100 % annehmen können, handelt es sich um ein kontinuierliches Optimierungsproblem. Der Wertebereich der Entscheidungsvariablen ist über Formel 3.24 definiert.

$$\vec{0} \leq \vec{x}_e \leq \mathbb{1}_l \quad (3.24)$$

Randbedingungen der Spannungshaltung

Weitere Nebenbedingungen beschreiben die Einhaltung der Grenzen der Spannungshaltung und Betriebsmittelauslastung, damit ein Blindleistungsabruf nicht zu Grenzwertverletzungen führt. Analog zur Netz-Restriktionsanalyse werden hierbei die Sensitivitätswerte mit dem Blindleistungsabruf multipliziert und dadurch die Spannungs- und Belastungsänderung bestimmt. Diese müssen dann kleiner gleich den ermittelten Freiräumen sein. Eine Erweiterung besteht darin, dass nicht nur der Einfluss einer einzelnen Quelle, sondern die Überlagerung von mehreren Quellen berücksichtigt wird. Die Arbeitspunktabhängigkeit der Sensitivitätswerte kann aufgrund der Worst-Case-Betrachtung nicht durch eine iterative Ausführung der Netzsimulation abgebildet werden, weshalb Korrekturfaktoren (Formel 3.25g und 3.25h) auf Basis der Erkenntnisse der Netz-Sensitivitätsanalyse Abschnitt 3.2.1 eingeführt werden.

Die Formeln 3.25a bis 3.25f beschreiben die resultierenden Randbedingungen aus Sicht der Spannungshaltung. Die arbeitspunktabhängigen Sensitivitäten (Formel 3.25c und 3.25f) werden je nach Art des Blindleistungsabrufs (kapazitiv oder induktiv) so gewählt, dass eine maximale Änderung hin zum Spannungsgrenzwert, bzw. minimal weg von diesem abgebildet wird. Für die Bewertung des oberen Spannungsgrenzwerts bedeutet dies, dass bei kapazitiven Blindleistungsabruf die betragsmäßig größte Sensitivität und bei induktiven Blindleistungsabruf die betragsmäßig kleinste Sensitivität gewählt wird. Analoges gilt für den unteren Spannungsgrenzwert.

In Bezug auf die Auswertung und Diskussion in Abschnitt 3.2 erfolgt eine Korrektur nur bei induktivem Blindleistungsabruf. Der entsprechende Korrekturfaktor SeU_{kor} ergibt sich anhand der relativen Sensitivitätsänderung je MVar und dem eingesetzten Blindleistungspotenzial. Die Arbeitspunktabhängigkeit könnte wie in Abschnitt 3.2 direkt als Funktion des Blindleistungsabrufs ausgedrückt werden, was allerdings zu nichtlinearen Nebenbedingungen führen würde. Gewählt wird deshalb ein iterativer Ansatz. In Anbetracht der in Abschnitt 3.2.3 diskutierten Höhe der zu erwarteten Blindleistungsabrufe erscheint die Berücksichtigung durch Bezug der Sensitivitätsänderung auf das Minimum des Betrags von Blindleistungspotenzial und Blindleistungsbedarf nach Formel 3.25g in der ersten Iteration des Verfahrens als zweckmäßig. In den folgenden Durchläufen wird der Korrekturfaktor nach Formel 3.25h bestimmt, indem der Blindleistungsabruf aus dem vorherigen Schritt verwendet wird.

Da sich durch einen Blindleistungsabruf die Zweigverluste ändern, was Auswirkungen auf die Spannungshaltung hat, wird das freie Spannungsband ebenfalls iterativ korrigiert. Die Änderung der Wirk- und Blindverluste werden anhand ihrer Sensitivitätswerte und des Blindleistungsabrufs der letzten Iteration je Blindleistungsquelle ermittelt. Da der Einfluss der Verluste auf die Spannungshaltung aufgrund der geringen Verlustsensitivität gegenüber dem getätigten Blindleistungsabruf deutlich geringer ausfällt, wird auf eine zweig- und knotenscharfe Verrechnung verzichtet und im nächsten Schritt die anteiligen Verluste je Quelle zusammengefasst, auf deren Anschlusspunkt projiziert und mittels ihrer Spannungssensitivitätswerte das durch die Verluste zusätzlich belegte Spannungsband ($\Delta U_{V \max i}$ und $\Delta U_{V \min i}$ in Formel 3.25a und 3.25b) berechnet.

$$\sum_q^{q_{\max}} \frac{\delta U_{\max \text{ kor } i \ e}}{\delta Q_{\text{Quelle } q}} \cdot (-1 \cdot Q_{\text{Pot } q \ e}) \cdot x_{q \ e} \leq U_{\text{Grenz max } i \ e} - U_{\max i \ e} - \Delta U_{V \max i} \quad (3.25a)$$

$$\sum_q^{q_{\max}} \frac{\delta U_{\min \text{ kor } i \ e}}{\delta Q_{\text{Quelle } q}} \cdot Q_{\text{Pot } q \ e} \cdot x_{q \ e} \leq -U_{\text{Grenz min } i \ e} + U_{\min i \ e} - \Delta U_{V \min i} \quad (3.25b)$$

$$\frac{\delta U_{\max \text{ kor } i \ e}}{\delta Q_{\text{Quelle } q}} = \frac{\delta U_{\max i \ e}}{\delta Q_{\text{Quelle } q}} \text{ wenn } Q_{\text{Bedarf max } e} < 0 \quad (3.25c)$$

$$\frac{\delta U_{\max \text{ kor } i \ e}}{\delta Q_{\text{Quelle } q}} = \frac{\delta U_{\min i \ e}}{\delta Q_{\text{Quelle } q}} \cdot SeU_{\text{kor}} \text{ wenn } Q_{\text{Bedarf max } e} > 0 \quad (3.25d)$$

$$\frac{\delta U_{\min \text{ kor } i \ e}}{\delta Q_{\text{Quelle } q}} = \frac{\delta U_{\min i \ e}}{\delta Q_{\text{Quelle } q}} \text{ wenn } Q_{\text{Bedarf max } e} < 0 \quad (3.25e)$$

$$\frac{\delta U_{\min \text{ kor } i \ e}}{\delta Q_{\text{Quelle } q}} = \frac{\delta U_{\max i \ e}}{\delta Q_{\text{Quelle } q}} \cdot SeU_{\text{kor}} \text{ wenn } Q_{\text{Bedarf max } e} > 0 \quad (3.25f)$$

$$SeU_{\text{kor}} = 1 + \frac{1}{2} \cdot K F_{\text{SeU}} \cdot \min(|Q_{\text{Bedarf max } e}|, \sum_{q=1}^{q_{\max}} |Q_{\text{Pot } q \ e}|) \quad (3.25g)$$

$$SeU_{\text{kor}} = 1 + \frac{1}{2} \cdot K F_{\text{SeU}} \cdot \sum_{q=1}^{q_{\max}} |Q_{\text{Pot } q \ e}| \cdot x_{\text{it } q \ e} \quad (3.25h)$$

mit $i = 1, \dots, i_{\max}$

Wie in Abschnitt 3.2.2.2 beschrieben, ist es sinnvoll eine Bewertung differenziert nach Spannungsebenen durchzuführen. Für die MS-Ebene ist bei der Bestimmung der Spannungsextrema $U_{\min \text{ MS}}$ und $U_{\max \text{ MS}}$ eine Korrektur des Totbadeinflusses wie bereits erläutert vorzunehmen und bei der Berechnung nur die Sensitivität der MS-Ebene zu verwenden.

Für die Analyse der HS/MS-Ebene ist der Einfluss des Stufenschalters abzubilden. Zur Bestimmung der maximal und minimal auftretenden Spannung wird das Spannungsniveau der Unterspannungsseite um den Einfluss des Stufenschalters ($n_{\text{TAP}}(w, \Delta t) \cdot U_{\text{ST UW}}$) korrigiert, Formel 3.26a. Dies setzt voraus, dass das

Netzmodell die Spannungsschwankung der HS-Ebene nachbildet. $n_{\text{TAP}}(w, \Delta t)$ drückt dabei die Differenz der Stufenschalterposition zur Neutralposition aus (Formel 3.26b). An Berechnungszeitpunkten, an denen die Stufenschalterposition über der Neutralstellung liegt, wird $U_{\text{US}}(w, \Delta t)$ um den Korrekturterm erhöht, bzw. bei darunterliegen erniedrigt.

$$U_{\text{US kor}}(w, \Delta t) = U_{\text{US}}(w, \Delta t) \pm n_{\text{TAP}}(w, \Delta t) \cdot U_{\text{ST UW}} \quad (3.26a)$$

$$n_{\text{TAP}}(w, \Delta t) = |n(w, \Delta t) - n_{\text{neutral}}| \quad (3.26b)$$

Der Bewertungspunkt an der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators stellt sicher, dass die Impedanz des Transformators bzw. dessen Spannungssensitivität in die Bewertung einfließt. Ist darüber hinaus die HS-Ebene im Netzmodell modelliert, ist deren Sensitivität automatisch subsumiert. Unabhängig davon, ob die HS-Ebene im Modell vorliegt oder ob eine Vorgabe der 110-kV-Spannung über Zeitreihen erfolgt, sind Spannungs- bzw. Blindleistungsgrenzwerte für die HS-Ebene mit dem vorgelagerten Netzbetreiber abzustimmen. Dies liegt daran, dass zwar im Idealfall (HS-Ebene modelliert) der Einfluss der Blindleistungsbereitstellung des betrachteten MS-Netzes bewertet werden kann, sich aber bei einem gleichzeitigen Blindleistungsabruf aus mehreren MS-Netzen, Blindleistungsflüsse in der HS-Ebene überlagern können. Zudem sind, wie in Abschnitt 3.2.1 andiskutiert, Stabilitätsgrenzen zu beachten. Aus technischer Sicht ist es sinnvoll verschiedene Grenzwerte für einzelne Eingriffsklassen zu definieren, da z. B. ein kapazitiver Blindleistungsabruf im Starklastfall spannungsanhebend und sich somit tendenziell positiv für die HS-Ebene auswirkt, aber ein kapazitiver Abruf bei Starkeinspeisung zu einer zusätzlichen Spannungsanhebung führen würde. Aus technischer Sicht können als maximale Spannungsgrenzen grundsätzlich die vereinbarte maximale und minimale Betriebsspannung U_b (i. d. R. 96 kV und 123 kV¹³¹) verwendet werden, die ggf. zusätzlich über den Stellbereich des Stufenschalters am HS/MS-Transformator limitiert werden, siehe Formel 3.27a

¹³¹Besitzen alle im Netz bestehenden HS/MS-Transformatoren einen ausreichend großen Stellbereich, kann theoretisch durch Änderung von vertraglich vereinbarten Übergabespannung mit HS-Kunden und Anpassung von Schutzeinstellung auch u. U. ein größerer Wert als 123 kV zugelassen werden.

und 3.27b.

$$U_{\text{Grenz max}} = \min(U_{\text{b max}}, U_{\text{r}} + n_{\text{up max}} \cdot U_{\text{ST UW}}) \quad (3.27a)$$

$$U_{\text{Grenz max}} = \min(U_{\text{b min}}, U_{\text{r}} + n_{\text{down max}} \cdot U_{\text{ST UW}}) \quad (3.27b)$$

Randbedingungen der Betriebsmittelauslastung

Wie Formel 3.16 bis 3.19 im Abschnitt 3.2.2 zeigen, resultiert in Bezug auf die Betriebsmittelbelastung eine nichtlineare Nebenbedingung. Durch Einführung von Korrekturfaktoren für die Arbeitspunktsensitivität (analog zu den Spannungsnebenbedingungen) erhält man eine quadratische Abhängigkeit, da die Änderungen der Wirk- und Blindleistung weiter zu berücksichtigen sind. Im Folgenden wird eine lineare Randbedingung erreicht, indem die Änderung der Wirkleistung nicht mehr direkt als Funktion der Entscheidungsvariablen ausgedrückt wird. Die Wirkleistungsänderung wird nicht vernachlässigt, sondern über einen iterativen Aufruf des Verteilungsalgorithmus einbezogen. Beim ersten Durchlauf d werden die Hilfsvariablen \vec{x}_{it} mit 0 initialisiert und damit eine Änderung des Wirkleistungsflusses zunächst außer Acht gelassen. In den folgenden Durchläufen werden die Werte der Entscheidungsvariablen aus dem letzten Iterationsschritt übernommen ($\vec{x}_{\text{it}} = \vec{x}_e$) und diese anschließend neu bestimmt. Hierdurch kann eine lineare Randbedingung für die Blindleistungsänderung nach Formel 3.28a bis 3.29c definiert werden. Die für die Verlustsensitivität relevante Arbeitspunkt-korrektur wird analog zum Korrekturfaktor der Spannungssensitivität durchgeführt. Diese erfolgt im ersten Durchlauf unter Verwendung des Minimums von Blindleistungspotenzial und -abruf (Formel 3.28c). In den anschließenden Durchläufen wird der aktuell errechnete Blindleistungsabruf verwendet (Formel 3.28d). Die Maxima der Leistungswerte und Leistungssensitivitäten der nachfolgenden Gleichungen sind als Maximum des Betrags der jeweiligen Größe zu interpretie-

ren.

$$\sum_q^{q_{\max}} \frac{\delta Q_{\max \text{ kor } m \ e}}{\delta Q_{\text{Quelle } q}} \cdot |Q_{\text{Pot } q \ e}| \cdot x_{q \ e} \leq Q_{\text{frei } m \ e} \quad (3.28a)$$

$$\frac{\delta Q_{\max \text{ kor } m \ e}}{\delta Q_{\text{Quelle } q}} = \frac{\delta Q_{\text{Fluss max } m \ e}}{\delta Q_{\text{Quelle } q}} + \frac{\delta Q_{V \text{ max } m}}{\delta Q_{\text{Quelle } q}} \cdot SeQ_{\text{kor}} \quad (3.28b)$$

$$SeQ_{\text{kor}} = 1 + \frac{1}{2} \cdot KF_{\text{SeQv}} \cdot \min(|Q_{\text{Bedarf max } e}|, \sum_{q=1}^{q_{\max}} |Q_{\text{Pot } q \ e}|) \quad (3.28c)$$

$$SeQ_{\text{kor}} = 1 + \frac{1}{2} \cdot KF_{\text{SeQv}} \cdot \sum_{q=1}^{q_{\max}} |Q_{\text{Pot } q \ e}| \cdot x_{\text{it } q \ e} \quad (3.28d)$$

mit $m = 1, \dots, m_{\max}$

Bei den Blindleistungsfreiräumen kann bei der Sensitivitätswahl keine Fallunterscheidung in Analogie zu den Randbedingungen der Spannungshaltung (Formel 3.25a bis 3.25h) vorgenommen werden. Grund hierfür ist, dass ein Blindleistungsabruf im Hinblick auf die Zweigauslastung entlastend oder belastend wirken kann. Die Wirkung ist dabei abhängig von der Richtung der Wirk- und Blindleistungsflüsse auf den Zweigelementen, die sich von Arbeitspunkt zu Arbeitspunkt unterscheiden können. Da eine Worst-Case-Betrachtung je Eingriffsklasse vorgenommen wird, geht der Zusammenhang zwischen Flussrichtung und Vorzeichen der Sensitivität verloren, weshalb für einen kapazitiven und induktiven Blindleistungsabruf nur ein einheitlicher Blindleistungsfreiraum nach Formel 3.29a bis 3.29c definiert wird. Die Sensitivität wird dabei in Anlehnung an Formel 3.18 und 3.19 bestimmt. I. d. R. kann diese Vereinfachung hingenommen werden, da im Verteilungsnetz die übertragbare Leistung schon bei kurzen Leitungslängen eine Begrenzung der übertragbaren Leistung durch die Spannungshaltung und nicht durch die Betriebsmittelauslastung stattfindet (siehe Abbildung A.5 im Anhang A.6) und es folglich zu keinen großen Einbußen aufgrund der getätigten Näherung kommen sollte.

$$Q_{\text{frei } m \ e} = \sqrt{(S_{\text{Grenz max } m} - S_{\text{max } m \ e})^2 - (P_{\text{max } m \ e} + P_m)^2} \quad (3.29a)$$

$$P_m = \sum_q^{q_{\text{max}}} \left(\frac{\delta P_{\text{Fluss max } m \ e}}{\delta Q_{\text{Quelle } q}} + \frac{\delta P_{V \text{ max } m}}{\delta Q_{\text{Quelle } q}} \cdot SeP_{\text{kor}} \right) \cdot |Q_{\text{Pot } q \ e}| \cdot x_{\text{it } q \ e} \quad (3.29b)$$

$$SeP_{\text{kor}} = 1 + \frac{1}{2} \cdot K F_{\text{SePv}} \cdot \sum_q^{q_{\text{max}}} |Q_{\text{Pot } q \ e}| \cdot x_{\text{it } q \ e} \quad (3.29c)$$

mit $m = 1, \dots, m_{\text{max}}$

3.3.4.3 Umsetzung

Das hier betrachtete Problem besitzt lediglich Ungleichungsnebenbedingungen, sodass die anfangs formulierte Bedingung $k < l$ gegeben ist. Ebenso wird der Forderung nachgekommen, dass sowohl die Zielfunktion als auch die Randbedingungen linear von den Entscheidungsvariablen abhängen. Zur Lösung des formulierten Problems wird der Simplex-Algorithmus in Form einer verfügbaren Matlab-Funktion („linprog“) verwendet. Der Lösungsraum der Zielfunktion ist ein Polytop und das gesuchte Optimum liegt entweder in einer Ecke oder auf einer Kante (der Wert der Zielfunktion ist in diesem Fall entlang der Kante konstant) von diesem. Über den Simplex-Algorithmus werden die Ecken des Polytops geprüft, sodass auch bei einer mehrdeutigen Lösung („Kante“ der Polytops) sicher ein Optimum gefunden wird. Grundvoraussetzung ist hierfür, dass der Lösungsraum keine leere Menge darstellt. Dies könnte u. U. der Fall sein, wenn ein Worst-Case-Szenario einer Eingriffsklasse bereits Spannungs- oder Auslastungsverletzungen im Ausgangszustand aufweist, was im Normalfall nicht vorkommen sollte. In diesem Fall wird der Algorithmus nicht ausgeführt und die Gewichtungsfaktoren erhalten den Wert null. Theoretisch wäre es möglich, andere Algorithmen zur Optimierung der Spannungshaltung und/oder Betriebsmittelauslastung einzubinden, was im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht weiter verfolgt wird. Grund hierfür ist, dass primär mit Werkzeugen der Netzplanung eine Verbesserung der Blindleistungsbilanz bzw. eine Bestimmung von Blindleistungsdefiziten erfolgen soll und keine Optimierung des Betriebszustandes eines MS-Netzes. Letzteres erfolgt erst beim tatsächlichen Abruf der Blindleistung für die der Algorithmus die netzplanerisch abgesicherten Steuerparametern (Gewichtungsfaktoren) bereitstellt.

Ablauf der Optimierung

Der Ablauf des Verteilungsalgorithmus ist in Abbildung 3.31 dargestellt und gliedert sich in drei Phasen.

Phase 1: Als erster Schritt wird die Einhaltung der Netzrestriktionen geprüft. Sind diese bereits im Ausgangszustand verletzt, werden die Gewichtungsfaktoren zu null gesetzt und der Prozess bricht ab. An dieser Stelle könnte auch eine übergeordnete Regelung „Optionale Optimierungsalgorithmen“ eingebunden werden, die Freiräume in der Spannungshaltung und Betriebsmittel schafft, was aber im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter umgesetzt wird. Anhand des Vorzeichens des Blindleistungsbedarfs „ $Q_{\text{Bedarf}} < 0$ “ wird das benötigte Blindleistungspotenzial gewählt.

Phase 2: Über den „Simplex-Algorithmus“ werden die Gewichtungsfaktoren der ersten Iteration ($d = 1$) bestimmt. Anschließend erfolgt eine Korrektur der Sensitivitätswerte „Arbeitspunktkorrektur der Sensitivitäten“. Im Nachgang wird der Simplex-Algorithmus erneut ausgeführt und ab der zweiten Berechnung sowohl die Wirk- und Blindleistungsverluste bei den Randbedingungen der Betriebsmittelauslastung als auch der Spannungshaltung berücksichtigt. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis entweder die maximal aufgetretene Änderung über alle Entscheidungsvariablen einen Grenzwert unterschreiten oder ein Schleifenzähler überläuft¹³². Es erfolgt mindestens zwei Iterationen (Bedingung $d > 2$), um die Änderungen der Wirkleistungsflüsse zu berücksichtigen, die in der ersten Iteration vernachlässigt werden.

Phase 3: Abschließend werden die Entscheidungsvariablen auf den maximal zulässigen Blindleistungsbedarf bzw. Blindleistungsabruf (siehe Formel 3.20e) normiert und so die Gewichtungsfaktoren erzeugt „ $g_{Q\ q} = x_{it} / \min(Q_{\text{Bedarf max}}, Q_{\text{Abruf}})$ “.

Bei einer Bewertung mehrerer entkoppelter Spannungsebenen wird der Algorithmus separat je Spannungsebene (z. B. für die HS/MS- und MS-Ebene) ausgeführt. Der maximal zulässige Blindleistungsabruf ergibt sich als Minimum über alle Spannungsebenen.

¹³²Die Überwachung mittels Schleifenzähler ist notwendig, da es, wie einleitend in Abschnitt 3.3.4.3 beschrieben, mehrere gleichwertige Lösungen geben kann, zwischen denen ein Wechsel von Iteration zu Iteration erfolgen kann. Die Summe des Blindleistungsabrufs aus allen Quellen ändert sich dabei nicht, aber die Verteilung auf die einzelnen Blindleistungsquellen.

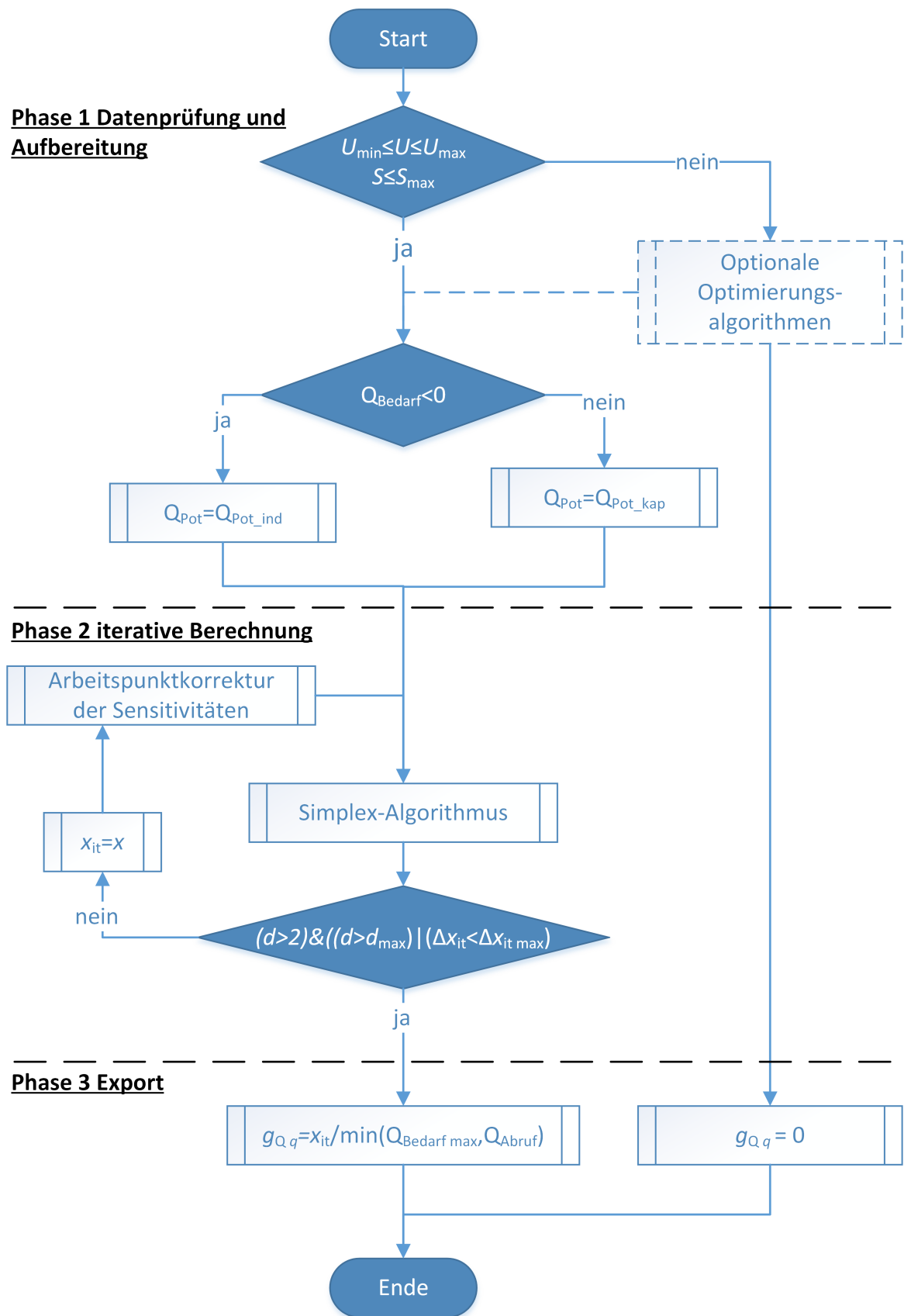


Abbildung 3.31: Ablauf der Optimierungsalgorithmus als Flussdiagramm.

3.4 Entwicklung eines Prognosemodells zur Bestimmung des Blindleistungspotenzials von Betrieben

Wie die vorausgegangenen Abschnitte des Kapitels 3 erläutern, benötigt das entwickelte Steuerungsverfahren für Blindleistungsquellen u. a. das induktive und kapazitive Blindleistungspotenzial von zu berücksichtigenden Blindleistungsquellen. Bei EZA ist die Blindleistungsfähigkeit und damit das Blindleistungspotenzial i. d. R. bekannt oder kann vom Anlagenbetreiber anhand von technischen Unterlagen erfragt werden. Dieses Potenzial ist, wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben, heute meist wirkleistungsabhängig. In Verbindung mit Prognosen zur Wirkleistungseinspeisung kann das Potenzial von EZA für jeden Berechnungszeitpunkt indirekt abgeschätzt werden.

Bei Betrieben mit BKA ist dieses Vorgehen nicht ohne weiteres möglich, da zwar die installierte Kompensationsleistung einfach bestimmt werden kann, aber das unkompensierte Blindleistungsverhalten unbekannt ist. Dieses kann, wie z. B. in [2] umgesetzt, über Messungen ermittelt werden. Die Erfahrung zeigt, dass Betriebe mit relevantem Potenzial meist eine Vielzahl¹³³ von kleineren Kompensationsanlagen besitzen, die verteilt im Kundennetz in den NS-Hauptverteilungen als Zentralkompensation für einzelne NS-Netze angeschlossen sind. Die Kompensationsanlagen sind dabei je nach Stufenanzahl über einen bis drei Schaltschränke aufgebaut. Die Messung gestaltet sich deswegen hinsichtlich Zeitaufwand für den Messaufbau (Planung und Umsetzung), sowie dem benötigten Messequipment (Messgeräte, Stromwandler, Spannungsabgriffe usw.) als aufwändig. Eine zentrale Erfassung und Bewertung des Potenzials ist heute noch nicht Stand der Technik¹³⁴, könnte aber mittelfristig dieses Problem lösen. Anzumerken ist, dass eine qualitativ hochwertige Bewertung des Blindleistungspotenzials keine triviale Aufgabe ist und deshalb in den meisten Fällen nicht ohne weiteres vom technischen Personal der Betriebe (trotz ggf. vorhandener Messtechnik) durchgeführt werden kann. Als sinnvoll erscheinen deshalb standardisierte Softwarelösungen, die im QQM implementiert werden und die Eingangsdaten für eine Potenzialbewertung über Dritte z. B. Kompensationsanlagenhersteller liefern. Anhand der Analyseer-

¹³³Die maximale Anzahl an erfassten BKA in einem MS-Betrieb lag bei Messungen im Rahmen von [2], bei 22 Stück mit einer Kompensationsleistung von ca. 9 MVar.

¹³⁴Ein erster Schritt in diese Richtung ist der in [2] modifizierte PowerQualityManager (PQM) (in dieser Arbeit gleichzusetzen mit dem QQM).

gebnisse kann letztendlich der Betrieb u. U. vorhandene Blindleistungspotenziale dem Netzbetreiber anbieten.

Um dennoch das Blindleistungspotenzial von Betrieben mit BKA zwischenzeitlich (d. h. bis entsprechende Softwarelösungen und Dienstleistungen vorhanden sind) im Rahmen des Steuerungsverfahrens berücksichtigen zu können, wird im Folgenden ein Prognosemodell zur Beschreibung des unkompensierten Blindleistungsverhaltens entwickelt, über das das Blindleistungspotenzial von Betrieben abgeschätzt werden kann. Ziel des Modells ist es nicht, das Blindleistungspotenzial der Betriebe mit einer 100%igen Genauigkeit zu beschreiben, sondern im ersten Schritt geeignete Betriebe zur Blindleistungskompensation der Netzgruppenbilanz zu identifizieren, d. h. eine Vorauswahl zu treffen. Je nach Höhe des im Steuerungsverfahren ermittelten Kompensationsbeitrags („Gewichtungsfaktor“) kann es unter Umständen im Anschluss sinnvoll sein, das Potenzial des Betriebs genauer, z. B. über Messungen, zu bestimmen. Das Prognosemodell soll im Gegensatz zu eigenständigen Messungen möglichst einfach anwendbar sein. Eingangsdaten bilden aus Sicht des Netzbetreibers bekannte Messwerte, die $\frac{1}{4}$ -Stunden-Mittelwerten von Wirk- und Blindleistung der Abrechnungsmessung am NVP, und möglichst wenigen zusätzlichen zu erhebenden Kenngrößen des Betriebs (z. B. die installierte Kompensationsleistung).

Ergebnis der Prognose ist das unkompensierte Blindleistungsverhalten eines Betriebs mit BKA, über das das induktive und kapazitive Blindleistungspotenzial ermittelt wird (Formel 3.30a und 3.30b). Das induktive Potenzial $Q_{\text{Pot ind}}(w, \Delta t)$ ergibt sich aus der Differenz des unkompensierten Verhalten $Q_{\text{unk}}(P(w, \Delta t))$ und des Istblindleistungsverhaltens $Q(w, \Delta t)$ und ist gleichzusetzen mit einem Abschalten von aktiven Stufen der BKA. Kapazitives Potenzial $Q_{\text{Pot kap}}(w, \Delta t)$ hingegen besteht in zuschaltbaren Stufen. Es ist beschreibbar über die installierte Kompensationsleistung Q_{inst} abzüglich der Leistung der momentan aktiven Stufen, die dem induktiven Potenzial entsprechen. Das induktive oder kapazitive Potenzial kann maximal den Betrag der installierten Leistung annehmen (For-

mel 3.30c und 3.30d).

$$Q_{\text{Pot ind}}(w, \Delta t) = Q_{\text{unk}}(P(w, \Delta t)) - Q(w, \Delta t) \quad (3.30a)$$

$$Q_{\text{Pot kap}}(w, \Delta t) = Q_{\text{inst}} - Q_{\text{Pot ind}}(w, \Delta t) \quad (3.30b)$$

$$Q_{\text{Pot ind}}(w, \Delta t) \leq |Q_{\text{inst}}| \quad (3.30c)$$

$$|Q_{\text{Pot kap}}(w, \Delta t)| \leq |Q_{\text{inst}}| \quad (3.30d)$$

3.4.1 Konzeption des Prognosemodells

Die Grundfunktionalität des Prognosemodells besteht in der Beschreibung des mathematischen Zusammenhangs zwischen dem Wirkleistungsverhalten P und dem unkompensierten Blindleistungsverhalten Q_{unk} von Betrieben. Darüber hinaus werden weitere Einflussfaktoren diskutiert und ggf. deren notwendige Abbildung in der Prognose erläutert. Die gemessene Blindleistung beinhaltet sowohl unkompensiertes als auch kompensiertes Verhalten und erlaubt somit keinen direkten Rückschluss auf das vorhandene Blindleistungspotenzial des Betriebs. Die Datengrundlagen der nachfolgend durchgeführten Untersuchung bildet ein Messdatensatz von 20 Einzelmessungen¹³⁵, der im Anhang A.10 näher beschrieben ist und von der Firma KBR Kompensationsanlagenbau GmbH zur Verfügung gestellt wurde. Nach der Plausibilisierung und Aufbereitung der Daten stehen 13 unabhängige Datensätze zur Entwicklung des Prognosemodells zur Verfügung.

Die anfänglich aufgestellte These, dass das Wirkleistungsverhalten und das unkompensiertes Blindleistungsverhalten nicht unabhängig voneinander sind, kann durch die durchwegs hohen Werte der Korrelationskoeffizienten r (im Mittel bei ca. $r = 0,94$, maximal bei $r = 0,99$, minimal bei $r = 0,76$) bestätigt werden. Dies gilt sowohl für die Summenleistung als auch für die einzelnen Phasen, was Abbildung 3.32 entnommen werden kann.

Abbildung 3.33 zeigt die vorhandene Datenbasis als $\cos\varphi(\frac{P}{P_{\text{max}}})$ - und $\tan\varphi(\frac{P}{P_{\text{max}}})$ -Diagramm. Hierbei wird die Wirkleistung auf den erfassten Maximalwert normiert, um die Daten vergleichbar zu machen. Es zeichnet sich ein fast durch-

¹³⁵Der Umfang der Datenbasis erhebt nicht den Anspruch, die Grundgesamtheit des unkompensierten Verhaltens verschiedenster Betriebe zu beschreiben. Er ist vielmehr als Stichprobe zu verstehen, über die das Prognoseverfahren hergeleitet wird. Für die Anwendung in der Praxis wäre es notwendig, die Datenbasis sukzessive auszubauen.

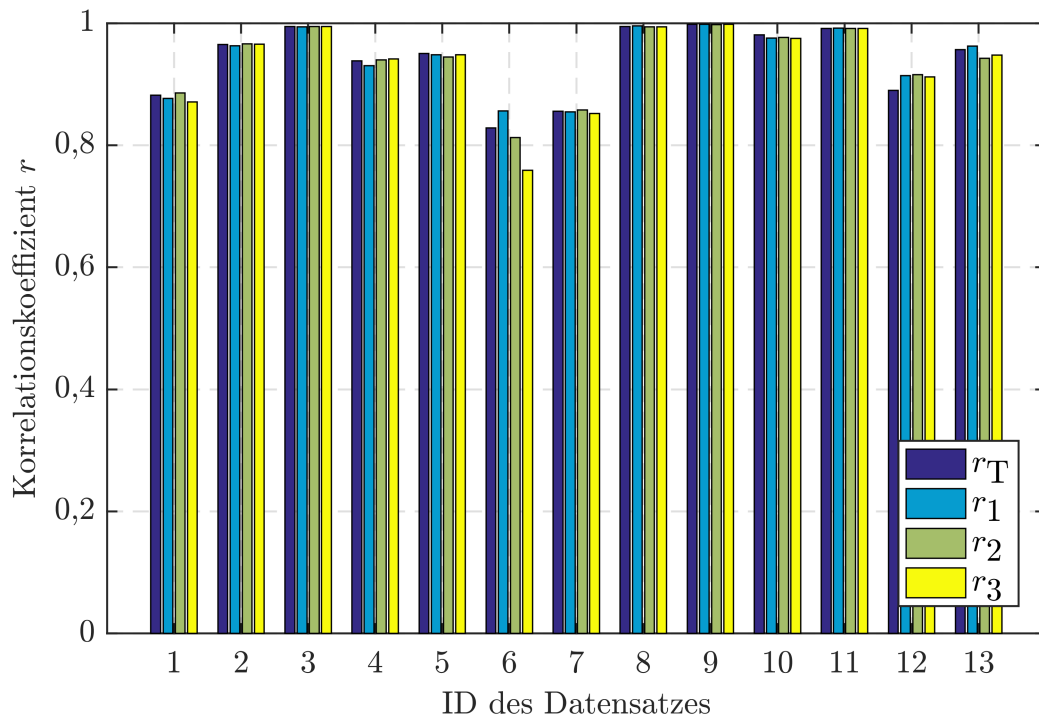


Abbildung 3.32: Totaler r_T und phasenweiser $r_1 \dots r_3$ Korrelationskoeffizient zwischen Wirk- und Blindleistung von 13 Datensätzen unkomensierter Betriebe.

wegs induktives Verhalten ab, was nur durch einzelne kapazitive Messwerte bei $P < 20 \%$ unterbrochen wird. Für die weitere Auswertung wird das $\tan\varphi(P)$ -Verhalten gewählt, da in diesem bei konstantem P -Wert eine höhere Auflösung der Ordinate und bei Vorzeichenwechsel der Blindleistung ein zusammenhängende Punktwolke gewährleistet wird.

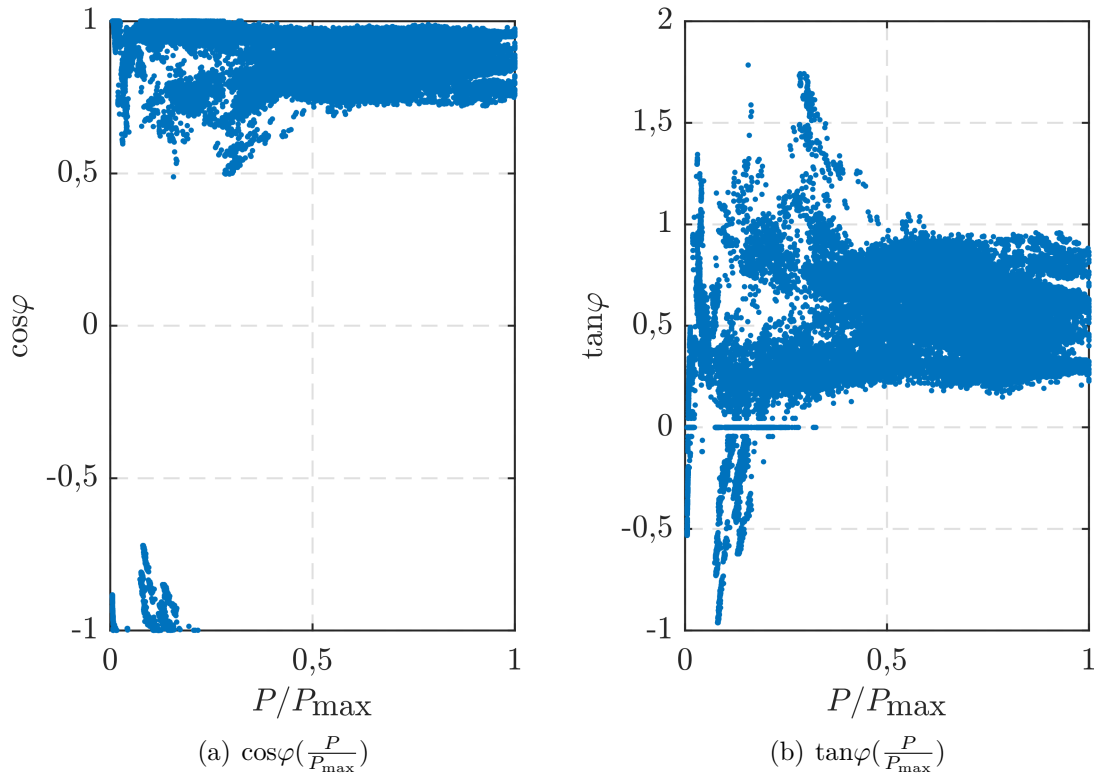


Abbildung 3.33: Darstellung der normierten Datenbasis (10-Minuten-Mittelwerte 13 unkompensierter Betriebe) im $\cos\varphi(\frac{P}{P_{\max}})$ - und $\tan\varphi(\frac{P}{P_{\max}})$ -Diagramm.

Im Folgenden wird zur Ableitung einer Prognosefunktion der verfügbare Datensatz statistisch ausgewertet:

1. Im ersten Schritt werden **Klassen über die Definition von Wirkleistungsgrenzen** gebildet. Empirisch hat sich hierbei eine äquidistante Klassenbreite von 5 % bewährt, da hierbei eine Mindestzahl von 200 Messpunkten je Klasse für die statistischen Untersuchungen in den meisten Fällen eingehalten werden kann.
2. Im zweiten Schritt werden die einzelnen Untergruppen statistisch ausgewertet. Ergebnis ist der **$\tan\varphi$ -Erwartungswert je Klasse**, der anhand einer geeigneten¹³⁶ Verteilungsfunktion ermittelt wird.
3. Im dritten und letzten Schritt werden die Stützstellen der **Prognosefunktion** anhand der Mittelwerte der Wirkleistungsbereiche und der ermittelten $\tan\varphi$ -Erwartungswerte definiert.

¹³⁶Die Wahl der Verteilungsfunktion wird im nächsten Abschnitt erläutert.

3.4.2 Ermittlung der Prognosefunktion

Die in Abbildung 3.33 dargestellten Datenbasis wird entlang der Abszisse in 20 Wirkleistungsklassen¹³⁷ mit äquidistanter Klassenbreite von 5 % unterteilt. Anschließend erfolgt eine statistische Auswertung der Daten je Klasse, bei der eine geeignete Verteilungsfunktion¹³⁸ bestimmt wird. Verwendet wird hierbei die MATLAB-Funktion „allfitdist“. Wie Abbildung 3.33 beispielhaft zeigt, kann die Verteilungsfunktion teilweise nur näherungsweise bestimmt werden. In der exemplarisch ausgewählten Wirkleistungsklasse $60 \% < \frac{P}{P_{\max}} \leq 65 \%$ bilden sich mehrere Maxima der Messdaten (blaue Säulen mit „empirical“ in Legende bezeichnet) aus, was eine multimodale Verteilung kennzeichnet und darauf hindeutet, dass womöglich mehrere Grundgesamtheiten vorhanden sind. Aufgrund dieser Gegebenheit kann zwar eine beste Verteilungsfunktion (beta-Verteilung in diesem Beispiel) ermittelt werden, jedoch können alle vier dargestellten Verteilungsfunktionen die Messdaten nur ungenügend genau nachbilden.

¹³⁷Die Einteilung ergibt sich als Kompromiss zwischen einer hohen Auflösung und der Anzahl an Punkten je Klasse.

¹³⁸Über die Funktion „allfitdist“ wird ein Ranking von Verteilungsfunktionen ermittelt. Hierbei werden zunächst die Parameter für einen Satz von Verteilungsfunktionen bestimmt. Dies erfolgt über eine Parameterschätzung anhand der Maximum-Likelihood-Methode. Vereinfacht ausgedrückt, werden die Parameter der jeweiligen Verteilungsfunktion so bestimmt, dass eine minimale Abweichung zum Messdatensatz besteht. Anschließend wird die Güte der Näherung über die verschiedenen Verteilungsfunktionen über das Bayesian information criterion (BIC) quantifizierbar gemacht und somit ein Ranking ermöglicht. Das BIC bewertet nicht nur die Genauigkeit der Anpassung, sondern zusätzlich die Komplexität des Modells. Eine hohe Anzahl an Modellparametern wirkt sich hierbei strafend aus.

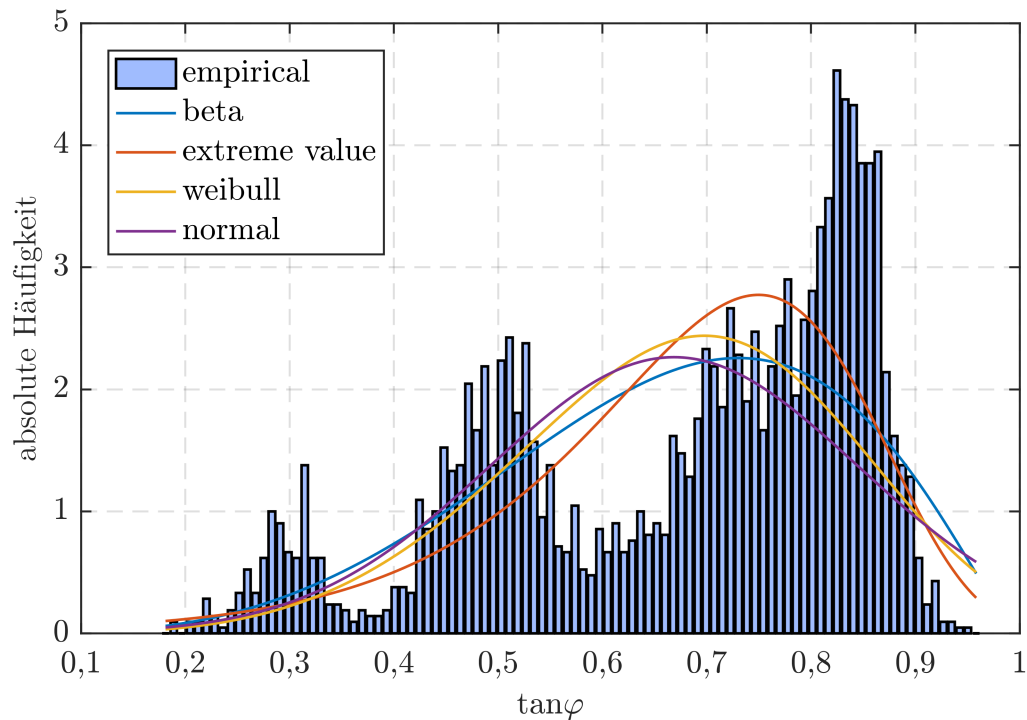


Abbildung 3.34: Ergebnis der Bestimmung der Verteilungsfunktion der $\tan\varphi$ -Werte in der Wirkleistungsklasse $60 \% < \frac{P}{P_{\max}} \leq 65 \%$.

Aufbauend auf dieser Erkenntnis wird die Datenbasis (Datensätze von 13 Betrieben) weiter unterteilt. Im Ergebnis entstehen drei Untergruppen/Typen (Typ 1 bis 3), die in Abbildung 3.35 dargestellt sind. Im Vergleich zum vollständigen Datensatz (Typ 4) zeigt sich nun ein deutlich differenziertes Bild. Die Zuordnung eines der 13 Datensätze zu einem Typ erfolgt über eine individuelle Bewertung der $\frac{P}{P_{\max}}$ - $\tan\varphi$ -Diagramme jedes einzelnen Messdatensatzes eines Betriebs, wobei Betriebe mit gleichen/ähnlichem Verhalten zu einem Typ zusammengefasst werden. Als Einordnungskriterium wird das $\tan\varphi$ -Verhalten bei Schwach- ($P \rightarrow 0$) und Starklast ($P \rightarrow 1$) sowie deren Übergang verwendet. Diese Unterteilung ermöglicht eine genauere Beschreibbarkeit der einzelnen Wirkleistungsklassen über Verteilungsfunktionen, da multimodale Verteilungen aufgehoben werden.

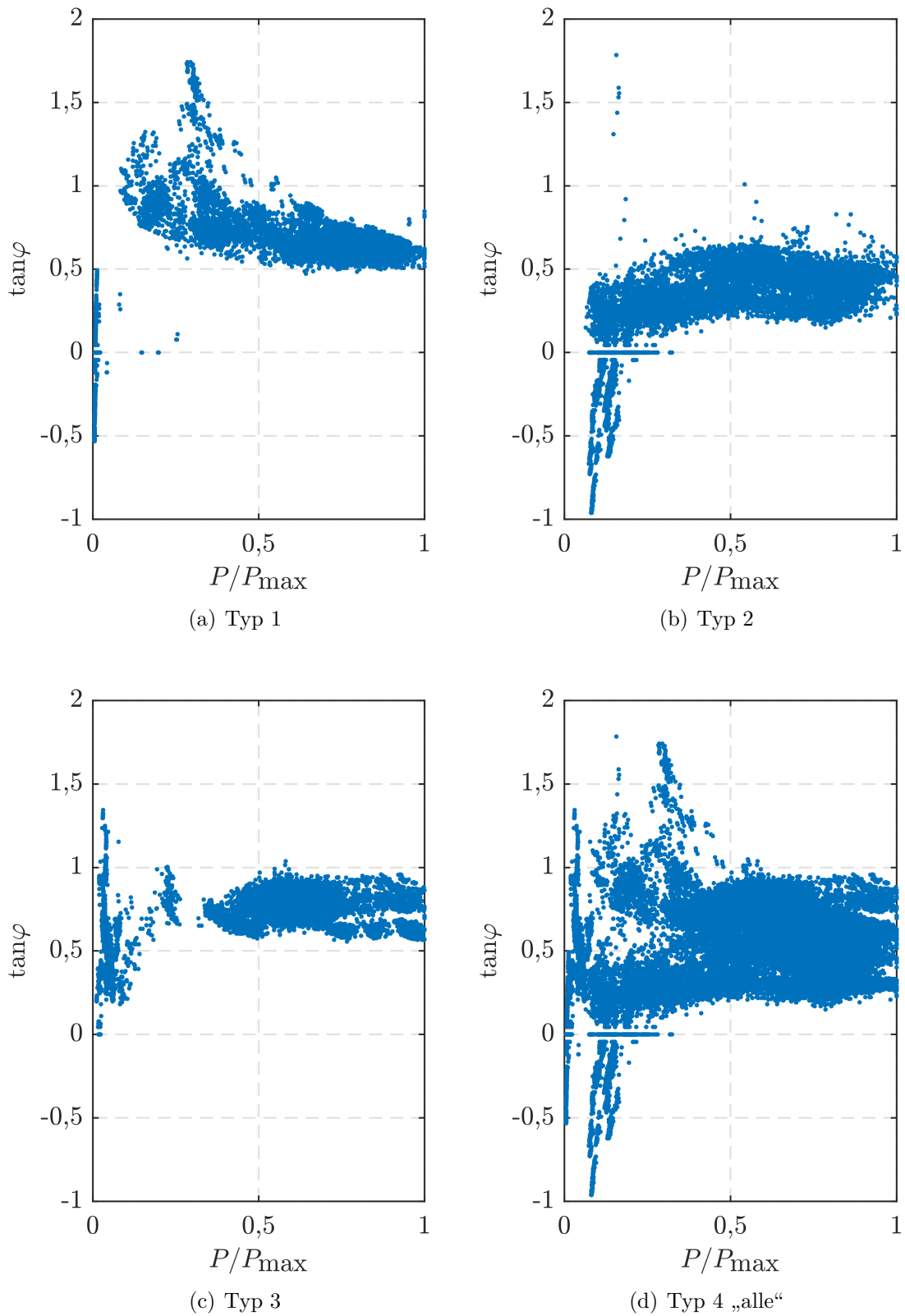


Abbildung 3.35: Darstellung der normierten Datenbasis (Typ 4) und Untergruppen (Typ 1-3) im $\tan\varphi(P)$ -Diagramm.

Tabelle 3.3 beschreibt die vier Typen bzw. die Einordnungsmerkmale näher. Die Charakterisierung erfolgt in Abstimmung mit Messtechnikern der Firma KBR Kompensationsanlagenbau GmbH, die die diskutierten Messdaten zur Auslegung von BKA verwenden. Bei Typ 1 und 3 sind Auffälligkeiten bei Werten mit $P < 0,1$ zu beobachten. Bei Typ 1 resultieren die Ausreißer aufgrund einer „Abschaltung“ übers Wochenende. Bei Typ 3 reduziert sich prinzipiell der induktive Bedarf mit sinkender Wirkleistungsaufnahme. Der Anstieg einzelner $\tan\varphi$ -Punkte wird durch einen einzelnen Betrieb mit konstanter induktiver Grundlast hervorgerufen.

Tabelle 3.3: Beschreibung der auszuwertenden Typen der Datenbasis.

Typ	$\tan\varphi(P \rightarrow 0)$	$\tan\varphi(P \rightarrow 1)$	Beschreibung
1	induktiv	0,6	Abnehmender induktiver Bedarf bei steigender Wirkleistung. Verhalten bei Starklast deutet auf Vorhandensein reiner Wirkleistungsverbraucher und/oder geregelter Antriebe in Kombination mit unregelten Antreiben bei Schwachlast hin.
2	kapazitiv	0,5	Zunehmender induktiver Bedarf bei steigender Wirkleistung. Verhalten deutet auf Dominanz von geregelten Antrieben bei Starklast in Kombination mit kapazitiver Grundlast ¹³⁹ hin.
3	induktiv	0,6	Zunehmender induktiver Bedarf bei steigender Wirkleistung. Verhalten deutet auf Dominanz von unregelten Antrieben bei Starklast und induktiver Grundlast ¹⁴⁰ hin.
4	-	-	Vollständige Datenbasis mit allen Messdatensätzen.

¹³⁹Eine kapazitive Grundlast kann z. B. durch die Ladeleistung der Betriebsinternen MS-Leitungen oder durch feste Kompensationsstufen entstehen.

¹⁴⁰Eine induktive Grundlast kann durch betriebsinterne Prozesse entstehen, die einen durchgängig induktiven Bedarf direkt besitzen oder diesen indirekt durch Blindleistungsverluste an Leitungen und Transformatoren erzeugen.

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung, d. h. die Stützstellen der Prognosefunktion jedes Typs sind in Abbildung 3.36 in Form des Erwartungswert je Wirkleistungsklasse dargestellt. Die Anwendbarkeit der Prognose wird im nächsten Ab-

schnitt näher diskutiert. Für den Typ 4 ergibt sich im Bereich $20 \% \leq P \leq 100 \%$ ein mittlerer Erwartungswert von ca. 0,62 d. h. $\frac{0,62 \text{ MVA}_{\text{r}}}{1 \text{ MW}}$ ¹⁴¹. Der Maximalwert liegt in diesem Bereich bei ca. 0,72. Bei P gegen 100 % strebt der $\tan\varphi$ gegen 0,56. Bei Werten $P < 20 \%$ strebt der Erwartungswert gegen ca. 0,2. Das mittlere Verhalten von Typ 4 zeigt sich prinzipiell in allen im Projekt [2] durchgeführten Messungen (siehe [7]), d. h. das induktive Potenzial geht dort bei Schwachlast sogar gegen null und korreliert mit dem Wirkleistungsbezug. Folglich besitzen lediglich Betriebe mit signifikanter Grundlast ein relevantes zeitlich durchgängig verfügbares induktives Blindleistungspotenzial.

Die Prognosefunktionen spiegeln resultierende Verhältnisse bei heutigen Lasten wieder. Im Zuge der Modernisierung von Maschinen und der Einführung neuer Technologien verlieren diese mittelfristig ihre Gültigkeit.

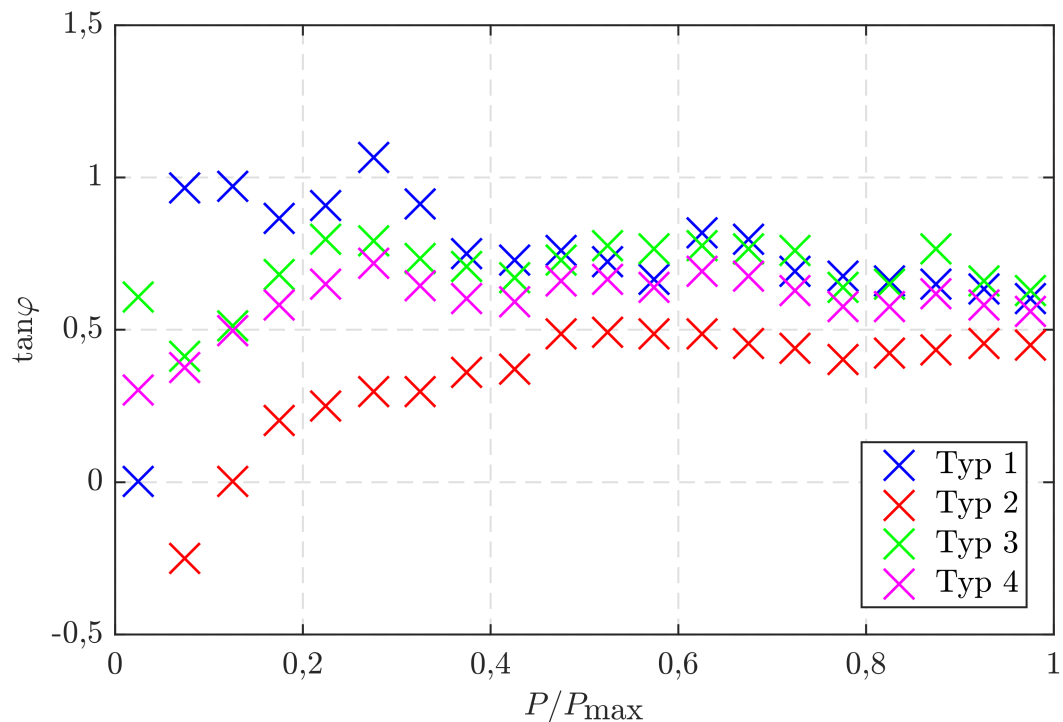


Abbildung 3.36: Darstellung der Stützstellen der ermittelten Prognosefunktionen der vier betrachteten Betriebstypen zur Ableitung des unkompensierten Blindleistungsverhaltens von Betrieben.

¹⁴¹Bezogen auf einen Ziel- $\cos\varphi$ von 0,98 ergibt sich ein induktives Potenzial von 0,4 MVA_r je MW.

3.4.3 Modellbildung und Evaluierung

Im Rahmen dieses Abschnitts wird die Anwendbarkeit der in Abbildung 3.36 dargestellten Prognosefunktionen zur Ableitung des unkompensierten Blindleistungsverhaltens evaluiert. Hierzu wird zunächst der Fehler der Potenzialprognose in einer Auflösung von 10-Minuten-Mittelwerten an 5 real gemessenen Messpunkten¹⁴² ermittelt und diskutiert. Anschließend werden verschiedene Einflussfaktoren näher untersucht und bewertet.

Die Messpunkte 1 bis 4 repräsentieren Messungen realer NS-Netze mit BKA. Messpunkt 5 ergibt sich aus Überlagerung der Messpunkte 1 bis 4, zuzüglich der Verluste der Netzbetriebsmittel der MS-Ebene und dient als Referenzmessung für die Untersuchungen im Abschnitt 3.4.4.

Der Prognosefehler $f_{\text{Prog}}(w, \Delta t)$ wird in Prozent des real gemessenen maximal unkompensierten Verhaltens ausgedrückt, siehe Formel 3.31. Eine Normierung auf den zeitsynchronen Messwert wird nicht gewählt, da dieser auch temporär gegen null geht und somit sehr hohe relative Fehlerwerte auftreten würden, die nicht mehr verhältnismäßig interpretierbar wären. Der Wert der Normierungsgröße $\max(Q_{\text{unk mess}}(w, \Delta t))$ ist in Tabelle 3.4 je Messpunkt angegeben.

$$f_{\text{Prog}}(w, \Delta t) = \frac{Q_{\text{unk mess}}(w, \Delta t) - Q_{\text{unk Prog}}(w, \Delta t)}{\max(Q_{\text{unk mess}}(w, \Delta t))} \cdot 100 \quad (3.31)$$

Bei der Prognose wird berücksichtigt, dass das induktive Potenzial maximal den Wert der installierten Blindleistung annehmen kann¹⁴³. Dies wird umgesetzt, indem geprüft wird, ob die Differenz zwischen unkompensierten zu Istblindleistungsverhalten größer ist, als der Betrag der installierten Leistung. Ist dies der Fall, wird eine lineare Skalierung der Prognosewerte nach Formel 3.32 vorgenommen. Dieses Vorgehen stellt sicher, dass das maximale induktive Potenzial nicht überschätzt wird. Eine Überschätzung des Potenzial trat im Rahmen der

¹⁴²Die Messdaten stammen aus [2] und wurden mittels Energiedatenrekordern des Typs PEL 102 über die Dauer von mehreren Wochen je Messpunkt aufgezeichnet.

¹⁴³Die Untersuchung verschiedener MS-Betriebe in [2] ergab, dass man bestimmten Branchen kein pauschales Blindleistungspotenzial zuweisen kann, da die installierte Kompensationsleistung stark vom Technologiestand der Maschinen abhängig ist. So konnten z. B. Druckereien mit einer installierten Kompensationsleistung im MVAr-Bereich aber auch ohne BKA identifiziert werden. Die installierte Kompensationsleistung ist folglich ein erstes unverzichtbares Indiz für ein mögliches Blindleistungspotenzial.

Evaluierung nicht auf, weshalb von der Skalierung nicht Gebrauch gemacht wurde.

$$Q_{\text{unk Prog}}(w, \Delta t) = \left(\frac{\max(Q_{\text{unk Prog}}(w, \Delta t) - Q(w, \Delta t))}{|Q_{\text{inst}}|} \right)^{-1} \cdot Q_{\text{unk Prog}}(w, \Delta t) \quad (3.32)$$

Zu beachten ist, dass die Datengrundlagen Messdaten reiner Verbraucher enthält und folglich die Einspeisung aus EZA ggf. in der Prognose zugrundeliegenden Wirkleistungsfluss $P(w, \Delta t)$ nach Formel 3.33 korrigiert werden muss.

$$P(w, \Delta t) = P_{\text{mess NVP}}(w, \Delta t) - P_{\text{EZA}}(w, \Delta t) \quad (3.33)$$

Zur besseren Bewertbarkeit der Prognose zeigt Abbildung 3.37 exemplarisch für Messpunkt 1 den mittleren Prognosefehler (mean), sowie dessen Standardabweichung (STD) für verschiedene Wirkleistungsarbeitsbereiche. Anhang A.12 enthält für alle weiteren Messpunkte die Fehlerverteilung in Form von Boxplots und die analogen Grafiken zu Abbildung 3.37. Bis auf Messpunkt 3 besitzt die Prognose mit Typ 4 (T4) immer den geringsten mittleren Fehler. Der größte Fehler tritt dabei bei Messpunkt 4 mit einem Wert von ca. -12 % im Wirkleistungsbereich $\frac{P}{P_{\text{max}}} > 66$ % auf. Die Werte der Standardabweichung der vier Prognosetypen liegen durchwegs eng beieinander. Die maximal auftretende Standardabweichung beträgt bei Typ 4 ca. 7 %. Eine analog zu Formel 3.32 ausgeführte Skalierung der Prognosewerte auf die maximal eingesetzte Kompensationsleistung (interpretierbar als „Schleppzeigerwert“ der BKA) ergibt keine Verbesserung, da nur einzelne Prognosewerte in der Leistungsklasse $\frac{P}{P_{\text{max}}} > 66$ % richtig korrigiert werden und in den unteren Wirkleistungsbereichen der Fehler und auch die Streuung zunehmen.

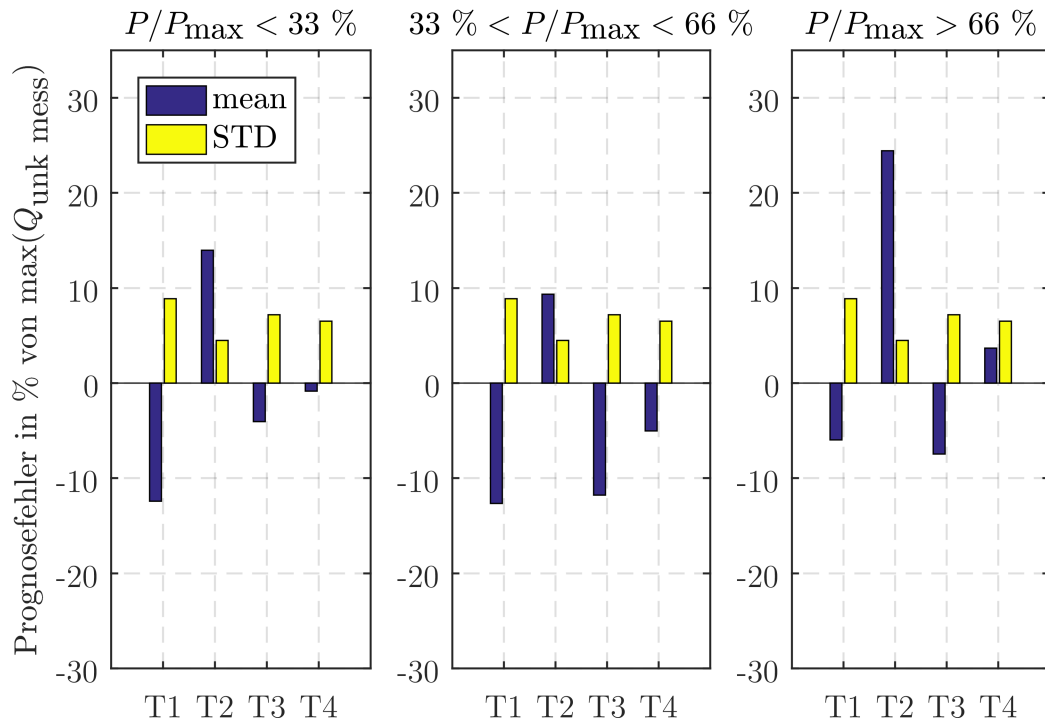


Abbildung 3.37: Vergleich des Fehlers verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 1. Der Normierungswerte beträgt 290 kVAr.

Die vier Referenzmesspunkte sind in Tabelle 3.4 näher beschreiben. Aufgrund der vorherrschend geregelten Antriebe¹⁴⁴ wird eine beste Übereinstimmung mit Prognosetyp 2 erwartet. Die durchgeführte Auswertung zeigt allerdings, dass primär der Prognosetyp 4 die besten Ergebnisse erzielt. Die Festlegung, welche Antriebstypen den Blindleistungsbedarf dominieren, gestaltet sich selbst für ortskundiges Personal als schwierig. Der vermeintliche Genauigkeitsgewinn durch eine Typzuweisung ist deshalb stark zu bezweifeln. Gleichzeitig zeigt der Vergleich von Prognose und Messung, dass die besten Ergebnisse mit Prognosetyp 4 erzielt werden, der einen Mittelwert über alle Typen repräsentiert. Im Folgenden wird deshalb Prognosetyp 4 für die weiteren Untersuchungen priorisiert.

¹⁴⁴Die Einschätzung zur Dominanz von geregelten bzw. unregelten Antrieben erfolgt auf Basis von Aussagen des technischen Personals des gemessenen Betriebs.

Tabelle 3.4: Beschreibung der auszuwertenden Typen der Datenbasis.

Messpunkt	Beschreibung	Prognosetypzuordnung	bester Prognosetyp	$\max(Q_{\text{unk mess}})$ in kVAr
1	Fertigung: Zerspansungsmaschinen	2	4	290
2	Fertigung: Zerspansungsmaschinen und Büro	2	4	198
3	Fertigung: Zerspansungsmaschinen	2	1	145
4	Fertigung: Lackiererei	2	4	191

Bei der Bewertung des Prognosefehlers ist zu beachten, dass die Verschiebungsblindleistung zu bewerten ist. Messgeräte, die die totale Blindleistung (enthält Verschiebungs- und Verzerrungsblindleistung) bestimmen, führen bei direkter Verwendung der Messerwerte ggf. zu stark abweichenden Ergebnissen. Abbildung 3.38 zeigt die Differenz zwischen totaler Blindleistung und Verschiebungsblindleistung an Messpunkt 3, die auf den Maximalwert der Verschiebungsblindleistung normiert wird. Selbst bei hohen Wirkleistungsarbeitspunkten stellt sich ein nicht zu vernachlässigender Fehler in Höhe von ca. 30 % ein.

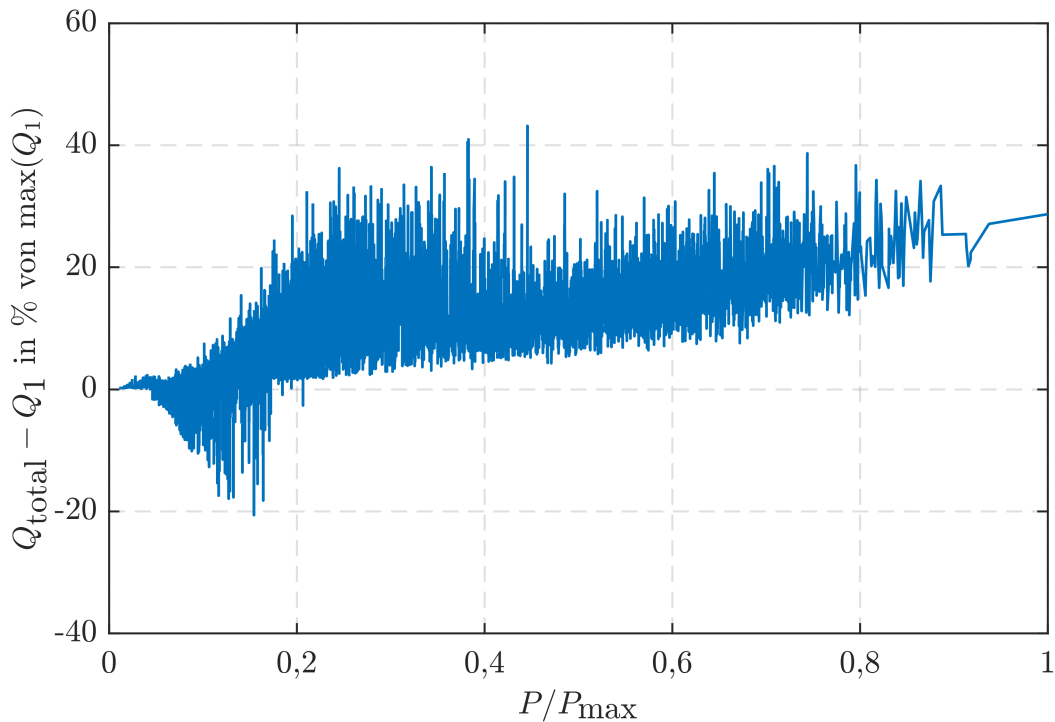


Abbildung 3.38: Auf maximal auftretende Verschiebungsblindleistung (145 kVar) normierter resultierender Fehler bei Verwendung der totalen Blindleistung anstelle der Verschiebungsblindleistung an Messpunkte 3.

3.4.4 Evaluierung der Übertragbarkeit der Prognose auf den Netzverknüpfungspunkt von Betrieben

Wie einleitend erwähnt, soll das Prognosemodell auf die beim Netzbetreiber verfügbaren Abrechnungsmessdaten der RLM am NVP basieren und nur möglichst wenige zusätzliche Messdaten benötigen. Als notwendige Kenngröße wurde bereits die installierte Kompensationsleistung der BKA in vorherigen Abschnitten eingeführt. Im Rahmen dieses Abschnittes wird die Anwendbarkeit der auf den NVP bezogenen Prognose evaluiert und diskutiert. Als Referenzwert wird Messpunkt 5 verwendet.

Bewertung der Netzverluste der MS-Ebene

Im Gegensatz zur Betrachtung in Abschnitt 3.4.3 ist am NVP nicht das an der BKA auftretende Wirkleistungsverhalten messbar, sondern dieses inklusive möglicher Verluste von MS/NS-Transformatoren und MS-Leitungen. Analoges gilt für die Blindleistung, weshalb im Folgenden zunächst dieser Einfluss diskutiert

wird.

Die Erfassung von verschiedenen Betrieben in [2] ergibt, dass die betriebsinterne Struktur der MS-Ebene sehr individuell aufgebaut ist. So wurden sowohl Strahlennetze als auch geschlossene Ringe vorgefunden. Es werden durchwegs Kabel verwendet, deren Leitungsquerschnitt oft in der Größenordnung von 50 mm^2 , aber auch deutlich größer liegen kann. Der Durchmesser der Betriebsfläche eines nahe Regensburg ansässigen großen Automobilherstellers beträgt ca. $1,5 \text{ km}^{145}$. Wie die maximal anschließbare Leistung in Abbildung A.5 im Anhang A.6 erahnen lässt, limitiert bei „kurzen“ Leitungslängen in der Größenordnung von wenigen km die Strombelastbarkeit der Leitung die übertragbare Leistung und nicht der Spannungsfall. Dies gilt auch für die angesprochenen Querschnitt in der Größenordnung von 50 mm^2 . In der Praxis werden die Leitungen allerdings deutlich unter der maximalen Auslastung betrieben. Als Grenzwertbetrachtung wird deshalb eine maximale Leitungsauslastung¹⁴⁶ von 50 % und eine Leitungslänge von 2 km diskutiert. Hinsichtlich der Transformatoren wird analog argumentiert.

Abbildung 3.39 zeigt die Wirk- und Blindverluste von verschiedenen MS-Leitungen¹⁴⁷ und MS/NS-Transformatoren. Die Betriebsmittelparameter können Tabelle A.8 und A.9 im Anhang A.12 entnommen werden. Die für die Prognose relevanten Wirkverluste liegen bei einer Leitungsauslastung bis 50 % bei ca. 0 bis $20 \frac{\text{kW}}{\text{km}}$. Die Blindverluste bei -40 bis $10 \frac{\text{kVar}}{\text{km}}$. Die Verluste am Transformator liegen zwischen ca. 0 bis 1 kW bzw. ca. 0 bis 8 kVar (zu beachten ist, dass nur die Blindverluste des Transformators in der Einheit 10^1 kVar dargestellt werden). Die Verluste der Transformatoren sind in guter Näherung sowohl für die Prognose als auch als Einflussgröße für den Blindleistungsabruf zu vernachlässigen.

Zur Bewertung wird im Folgenden ein MS-Netz eines Betriebs mit zwei je zwei Kilometer langen MS-Strängen mit je 15 MS/NS-Transformatoren betrachtet. Weiter wird unterstellt, dass die maximale Betriebsmittelauslastung gleichzeitig

¹⁴⁵Dieser Betrieb besitzt einen eigenen HS-Anschluss, wird aber zur Abschätzung einer maximalen MS-Leitungslänge aufgrund seiner großen Ausdehnung verwendet.

¹⁴⁶Die in [2] ausgewerteten Betriebe wiesen durchwegs eine maximale Leitungsauslastung < 50 % auf. Dennoch wird der Wert von 50 % gewählt, da dieser aus Redundanzgründen noch sinnvoll erscheint. Auf anrechenbare Gleichzeitigkeitsfaktoren der Last wird nicht eingegangen, da diese zu betriebspezifisch sind.

¹⁴⁷Die Bemessungsleistung der Leitung N2YSY 3x1x50 beträgt ca. 11 MVA und die des Typs N2XS2Y 3x1x240 ca. 20 MVA.

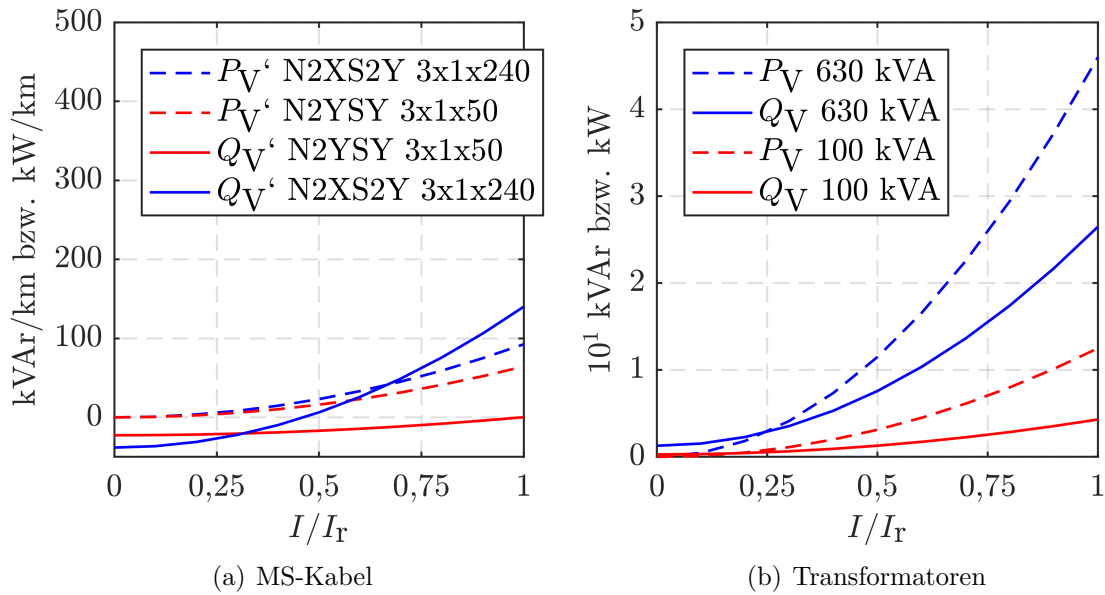


Abbildung 3.39: Wirk- und Blindverluste von MS-Leitungen und MS/NS-Transformatoren.

sowie mit einem Wert von 50 % bei den MS-Leitungen und ca. 100 %¹⁴⁸ bei den MS/NS-Transformatoren auftritt (Summenlast des Betriebs ca. 20 MVA). Die MS-Leitungen werden vereinfacht mit einer gleichbleibenden Belastung über die gesamte Leitungslänge gerechnet. In diesem fiktiven extremen Beispiel betragen die Verluste je 630-kVA-Transformator 4,6 kW bzw. 27 kVA_r und je N2XS2Y-Kabelstrang 60 kW bzw. 7 kVA_r. Für das gesamte MS-Netz ergeben sich ca. 360 kW bzw. 95 kVA_r bei einer Leistungsaufnahme von ca. 20 MVA oder relativ ausgedrückt Wirkverluste in Höhe von ca. 2 % und Blindverluste in Höhe von ca. 0,5 %. Hinsichtlich des in Abschnitt 3.4.3 bestimmten Prognosefehlers wird dieser Einfluss als unkritisch eingestuft, sodass direkt die Wirkleistungsmesswerte der RLM am NVP für die Prognose verwendet werden können.

Bewertung der Prognosefehlers

Analog zu den Ergebnissen von Messpunkt 1 bis 4 liefert der Prognosetyp 4 auch bei Anwendung der Prognose auf die Messdaten des NVP (Messpunkt 5) bei Betrachtung aller Leistungsbereiche die besten Ergebnisse beim mittleren Fehler (Fehlerbetrag ≤ 11 %), siehe Abbildung 3.40. Die Standardabweichung der verschiedenen Varianten unterscheidet sich nur noch um ca. ± 2 %. Die Bezugswerte für die Normierung des Fehlers, d. h. der Maximalwert des unkompensierten

¹⁴⁸Der Wert von 100 % ergibt sich durch die Verwendung von 630 kVA-Transformatoren und einer Spitzenlast von 20 MVA.

Verhaltens liegt bei ca. 675 kVAr.

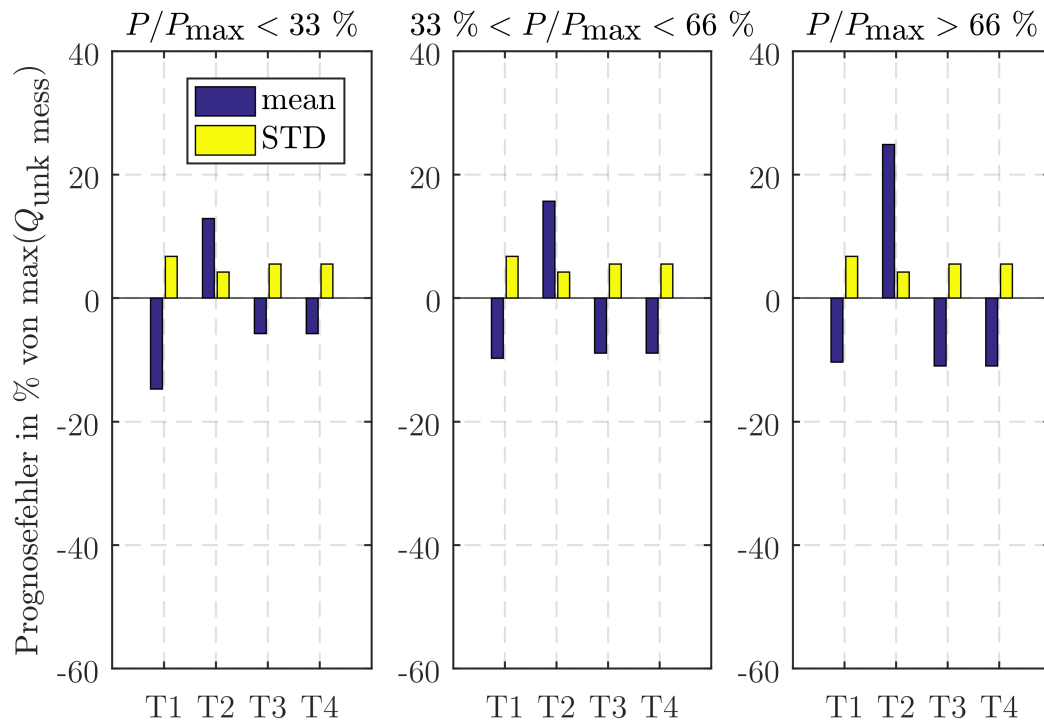


Abbildung 3.40: Vergleich des Fehlers verschiedener Prognosetypen am Netzverknüpfungspunkt (NVP) in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen. Der Normierungswerte beträgt 675 kVAr.

Ein weiterer noch nicht diskutierter Einflussfaktor ist das Vorhandensein von Lasten, die nahezu reine Wirkleistung beziehen. Diese sind in der Messung am NVP subsumiert und erhöhen das prognostizierte Blindleistungspotenzial aufgrund von Formel 3.32 bis maximal zur installierten Kompensationsleistung. Abbildung 3.41 zeigt die Ergebnisse, wenn die Wirkleistung am Messpunkt 5 um 50 % bei gleichbleibenden Blindleistungsverhalten erhöht wird. Der maximale mittlere Fehler von Typ 4 steigt von ca. -11 % auf ca. -55 % und zeigt somit eine deutliche Überschätzung des Blindleistungspotenzials. Die Standardabweichung verdoppelt sich nahezu.

Für die Anwendung der Prognosefunktion auf den NVP wird deshalb empfohlen, einen Skalierungsfaktor einzuführen (im Folgenden als P_{rel} bezeichnet), der den Anteil der gemessenen Wirkleistung mit kompensierten Blindleistungsverhalten beschreibt. Dieser kann beispielsweise über das Verhältnis der installierten Leistung von Transformatoren oder über Wirkenergieverbräuche von Netzbereichen mit/ohne BKA ermittelt werden.

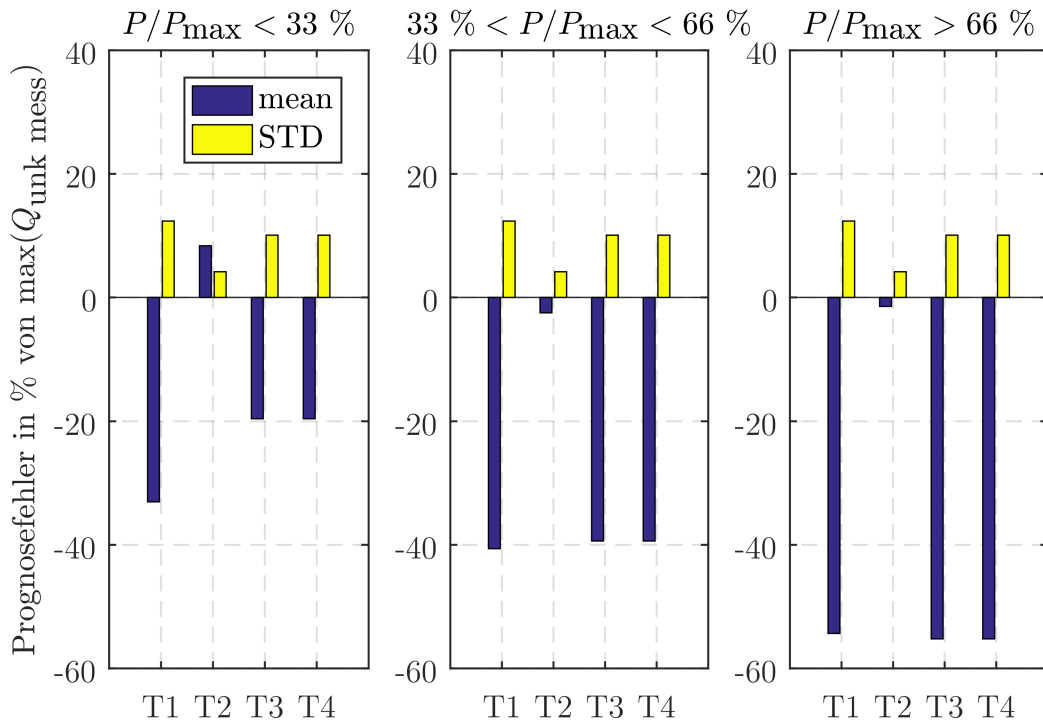


Abbildung 3.41: Vergleich des Fehlers verschiedener Prognosetypen am Netzverknüpfungspunkt (NVP) in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen. Der Normierungswerte beträgt 675 kVar.

3.4.5 Darstellung des Prognosemodells als Blockschaltbild

Das resultierende Modell ist in Abbildung 3.42 dargestellt und die notwendigen Ein- und Ausgangsdaten in Tabelle 3.5 beschrieben. Im ersten Schritt wird anhand der Wirkleistungsmessung $P_{\text{mess NVP}}$ am NVP und einem Skalierungsfaktor für das für die Prognose relevante Wirkleistungsverhalten P_{rel} das unkompenzierte Blindleistungsverhalten Q_{unk} berechnet. Im Anschluss wird die Blindleistungsänderung ΔQ bestimmt (Formel 3.34) und geprüft ob diese kleiner bzw. maximal gleich dem Betrag der installierten Kompensationsleistung Q_{inst} ist. Wird diese Bedingung verletzt, wird die Prognose nach Formel 3.32 limitiert und das induktive und kapazitive Blindleistungspotenzial nach Formel 3.30a und 3.30b ausgegeben.

$$\Delta Q = Q_{\text{unk}} - Q_{\text{mess NVP}} \quad (3.34)$$

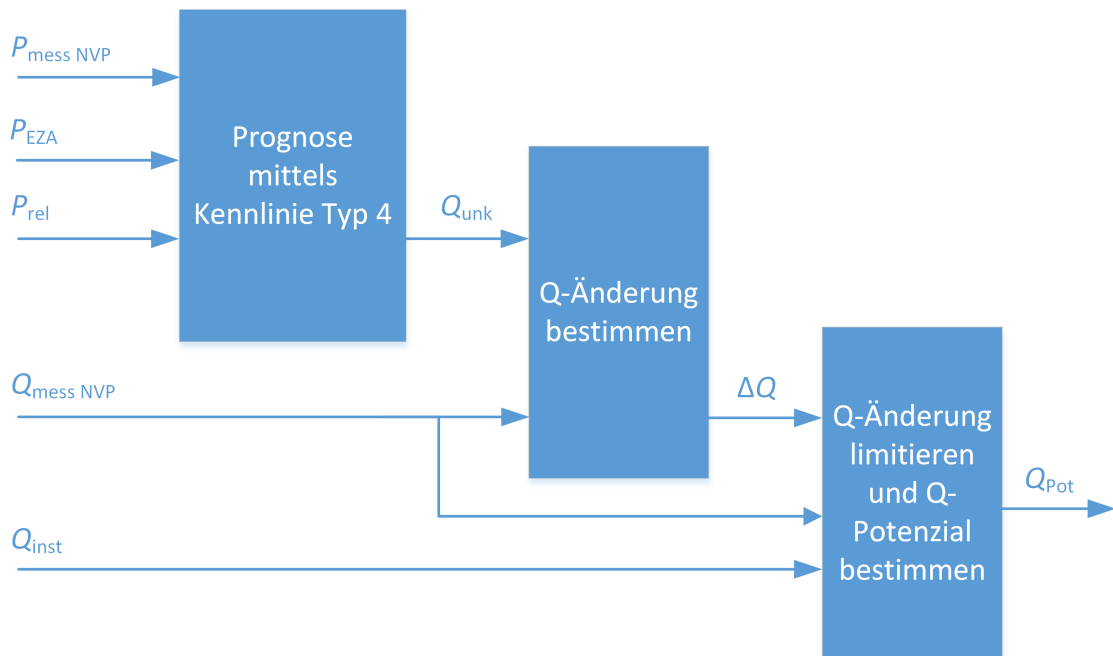


Abbildung 3.42: Darstellung des Prognosemodells als Blockschaltbild.

Tabelle 3.5: Ein- und Ausgangsdaten des Prognosemodells

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$P_{\text{mess NVP}}(w, \Delta t)$	MW	Wirkleistungsmessung am NVP
$P_{\text{rel}}(w, \Delta t)$	einheitenlos	Für Prognose relevanter Wirkleistungsanteil. Wertebereich 0...1.
$Q_{\text{mess NVP}}(w, \Delta t)$	MVAr	Blindleistungsmessung am NVP
Q_{inst}	MVAr	Summe der installierten Kompensationsleistung im Betrieb
$Q_{\text{Pot}}(w, \Delta t)$	MVAr	Prognostiziertes induktives und kapazitives Potenzial

3.4.6 Diskussion der Modellanwendbarkeit

Anhand der durchgeführten Analysen kann eine Abhängigkeit zwischen dem Wirkleistungsbezug und dem unkompensierten Blindleistungsverhalten von Betrieben bestätigt werden. Der mathematische Zusammenhang variiert allerdings stark von Betrieb zu Betrieb und ist von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig. Im Mittel ergibt sich bezogen auf einen Ziel- $\cos\varphi$ von 0,98 ein induktives Potenzial von 0,4 MVar je MW, mit abnehmender Tendenz aufgrund einer sinkenden Anzahl an Blindleistungsverbrauchern in modernen Anlagen. Die Evaluierung des Prognosemodells in Abschnitt 3.4 zeigt, dass Einflussfaktoren wie z. B. Art und Anzahl vorhandener Blindleistungsverbraucher¹⁴⁹ bzw. der Anteil an reinen Wirkleistungsverbrauchern entscheidenden Einfluss auf die Güte der abgeleiteten Prognosefunktion hat. Dies hat zur Folge, dass eine „exakte“ Prognose des Blindleistungspotenzials von einzelnen Betrieben über die ermittelte Funktion nicht möglich ist.

Weiter kann festgehalten werden, dass die Höhe der installierten Kompensationsleistung keine eindeutigen Rückschlüsse auf das vorhandene Blindleistungspotenzial zulässt, da dieses stark von den vorhandenen Blindleistungsverbrauchern abhängt und zudem heute oftmals „überschüssige“ Kompensationsleistungen vorhanden sind (siehe Anhang A.11).

Wie einleitend in Abschnitt 3.4 erwähnt, wird nicht der Anspruch erhoben, eine exakte¹⁵⁰ Potenzialprognose durchführen zu können. Vielmehr soll ein Werkzeug der Netzplanung zur Seite gestellt werden, über das eine erste Potenzialbewertung und somit eine Vorauswahl von ggf. relevanten Betrieben möglich ist. Aufgrund der Vielfältigkeit des Wirk-Blindleistungsverhaltens von Betrieben zeigt sich, dass die Anwendung von typisierten Prognosekennlinien nur einen augenscheinlichen Genauigkeitsgewinn generiert und somit nicht praxistauglich ist. Alternative Ansätze (außer aufwändige Messungen) gibt es derzeit nicht, weshalb die Anwendung der entwickelten Prognosefunktion (Typ 4) unter Beachtung der genannten Einschränkungen für eine erste Potenzialabschätzung von Betrieben in der Praxis als sinnvoll erscheint.

¹⁴⁹Hauptfaktoren sind Anzahl und Einsatzzeiten von un-/geregelten Antrieben und der Umfang an unkompensierten Leuchtmitteln.

¹⁵⁰Um das Blindleistungspotenzial von Betrieben mit BKA genauer bestimmen zu können, müsste ein detaillierteres Abbild der darin angeschlossenen Anlagen erstellt werden.

3.5 Weiterführende Aspekte

In diesem Abschnitt werden weiterführende Aspekte diskutiert, die im Rahmen dieser Arbeit nicht vollumfänglich untersucht werden können.

3.5.1 Blindleistungsabruf aus Sicht der Netzführung

Die Betrachtung von einzelnen Eingriffsklassen verfolgt den Ansatz „lokale Optima¹⁵¹“ unter Worst-Case-Bedingungen für die Aufteilung des Blindleistungsabrufs zu identifizieren und so effektiver die Blindleistungsbilanz einer MS-Netzgruppe verbessern zu können, als dies bei einer Betrachtung über alle Arbeitspunkte der Netzgruppe der Fall wäre. Darüber hinaus soll der Blindleistungsabruf bedarfsorientiert erfolgen, d. h. in Abhängigkeit des Blindleistungs-Istwerts und Blindleistungs-Sollwerts¹⁵² der Netzgruppe. Dies setzt allerdings voraus, dass der Wirk-Blindleistungsarbeitspunkt der Netzgruppe möglichst exakt bestimmt werden kann, damit Spannungs- und Belastungsgrenzen eingehalten werden können. Prognosen zum Istwert der Wirk- und Blindleistungsbilanz eines MS-Netzes über Regressionsfunktionen oder Zeitreihenanalyse, wie in [7, 68], scheinen bei Berücksichtigung dieses Aspektes und der möglichen Höhe des Prognosefehlers nur bedingt geeignet¹⁵³.

Als resultierende minimale Voraussetzung für den Koordinationsalgorithmus wird folglich eine Istwertübertragung¹⁵⁴ der Wirk-Blindleistungsbilanz vom Netzbetreiber zur Blindleistungsquelle angenommen. Über diese Verbindung wird der Istwert der Wirk- und Blindleistungsbilanz der Netzgruppe an die Blindleistungsquelle übertragen¹⁵⁵, die eigenständig anhand des Arbeitspunktes den Bedarf

¹⁵¹Das Blindleistungspotenzial von Blindleistungsquellen sowie die Freiräume im Spannungsband und in der Betriebsmittelauslastung variieren zwischen verschiedenen Netzgruppenarbeitspunkten, weshalb es lokale Optima gibt.

¹⁵²Der Blindleistungssollwert kann über einen festen Wert oder als Funktion der Wirkleistung definiert sein.

¹⁵³Die Prognosegenauigkeit liegt bei exemplarischen Netzgruppen im Mittel bei wenigen 100 kVar bzw. kW. Die Streuung ist allerdings nicht zu vernachlässigen und führt besonders in Netzen mit hoher installierten Leistung an WEA zu Ausreißern in Höhe von mehreren MW, so [7].

¹⁵⁴Erkenntnisse aus dem Projekt [2] zeigen, dass dieser Ansatz keineswegs unrealistisch, da bereits heute einzelne Netzbetreiber EZA mit NVP in der MS-Ebene pauschal in das Netzleitsystem integrieren. Die Kosten belaufen sich nach Schätzwerten eines Netzbetreibers auf ca. 3.000 € pro Anlage.

¹⁵⁵Heute bestehende Blindleistungsgrenzen gelten für 15-Minuten-Mittelwerte. Um innerhalb dieses Bewertungszeitraum regieren zu können, sollte die Übertragung in kleineren Zeitscheiben, z. B. auf Basis von 5-Minuten-Mittelwerten erfolgen.

und ihren Gewichtungsfaktor der entsprechenden Eingriffsklasse bestimmt. Alternativ kann die Bedarfsermittlung und -aufteilung auch beim Netzbetreiber erfolgen und der Blindleistungsquelle wird der einzustellende Blindleistungsabruf $Q_{\text{Abruf } q}(w, \Delta t)$ übermittelt. Letztere Variante besitzt den Vorteil, dass z. B. bei Änderungen der Netzstruktur und der damit verbundenen Neuermittlung der Gewichtungsfaktoren nur ein Update des Algorithmus beim Netzbetreiber und keine Neuparametrierung jeder Blindleistungsquelle erfolgen muss. Darüber hinaus kann bei vom Normalbetrieb abweichenden Netzschtatzuständen der Blindleistungsabruf deaktiviert werden, indem die Gewichtungsfaktoren zu null gesetzt werden.

Bei deterministischer Betrachtung des Blindleistungsabrufs ist zu beachten, dass ein aktiver Blindleistungsabruf aus der Vergangenheit (zum Zeitpunkt „ $(w - 1) \cdot \Delta t$ “) die Blindleistungsbilanz zum aktuellen Zeitpunkt $w \cdot \Delta t$ mit beeinflusst. Um nicht Gefahr zu laufen, den getätigten Blindleistungsabruf über andere Blindleistungsquellen zu kompensieren, muss dieser aus dem aktuellen Bedarf herausgerechnet werden. Der Blindleistungsabruf nach Formel 3.20a drückt den idealen Beitrag einer Quelle aus, der in der Realität aufgrund des ggf. limitierenden tatsächlich vorhandenen Blindleistungspotenzials nicht oder nur teilweise erbracht werden kann. Aufbauend auf der bereits eingeführten Bedingung, dass eine Istwertübertragung der Wirk-Blindleistungsbilanz vorhanden ist, wird deshalb zusätzlich eine Rückmeldung des tatsächlich von der Blindleistungsquelle bereitgestellten Blindleistungspotenzials $Q_{\text{Abruf akt } q}(w - 1, \Delta t)$ gefordert¹⁵⁶. Die resultierende Gleichung zeigt Formel 3.35.

$$Q_{\text{Bedarf}}(w, \Delta t) = Q_{\text{Soll}}(w, \Delta t) - [Q_{\text{Ist}}(w, \Delta t) - \sum_{q=1}^{q=q_{\text{max}}} Q_{\text{Abruf akt } q}(w - 1, \Delta t)] \quad (3.35)$$

Die somit vorausgesetzte bidirektionale Verbindung¹⁵⁷ (Ist- bzw. Sollwertübertra-

¹⁵⁶Diese zusätzliche Anforderungen spricht zusätzlich für eine Umsetzung des Steuerungsverfahrens beim Netzbetreiber. Eine Übertragung von Spannungs- und Leistungswerten vom Anschlusspunkt der Blindleistungsquelle wird nicht zwingend gefordert, da nicht sichergestellt werden kann, dass die Blindleistungsquelle am auslegungsrelevanten Netzknoten sitzt und somit trotzdem eine planerische Absicherung des Blindleistungsabrufs notwendig wird.

¹⁵⁷Bei Ausfall der Kommunikationsverbindung ist der Blindleistungsabruf aus den Blindleistungsquellen zu begrenzen. Als Basis zur Bestimmung eines minimal zulässigen Blindleistungsabrufs aus mehreren Blindleistungsquellen kann der in Abschnitt 3.3 beschriebene Algorithmus auf alle Arbeitspunkte der Netzgruppe angewendet werden, was gleich zu setzen ist mit der Betrachtung nur einer Eingriffsklasse. Ein gleichzeitiger Ausfall von Netzelementen ist hiermit nicht abgedeckt.

gung und Rückmeldung des eingesetzten Blindleistungspotenzial) zwischen Netzbetreiber und Blindleistungsquelle, stößt die Überlegung an, den optimalen Blindleistungsabruf für jeden Abrufzeitpunkt unter Verwendung des tatsächlich aktuell verfügbaren Blindleistungspotenzials neu zu berechnen. Dies setzt allerdings voraus, dass eine Onlinenetzberechnung seitens der Netzführung möglich ist. Die Onlinenetzberechnung könnte als Auskopplung der Gewichtungsfaktorberechnung, d. h. über das Koordinationsverfahren, einer Eingriffsklasse aus Abschnitt 3.3 realisiert werden. Die Worst-Case-Parameter müssten dabei seitens der Netzplanung im Vorfeld bestimmt werden. Eine reine Abbildung in der Netzführung stellt aus netzplanerischer Sicht keinen Mehrwert dar, da zwar der Netzbetrieb für den jeweiligen Zeitpunkt optimiert wird, aber bereits im Vorfeld bewertet werden muss, welche Blindleistungsquellen zu erschließen sind bzw. wo ggf. neue erreicht werden könnten. Aus diesem Grund wird in Kapitel 4 keine „Onlineberechnung der Gewichtungsfaktoren“ umgesetzt, da der Fokus dieser Arbeit auf den Aspekten der Netzplanung liegt.

Über das entwickelte Steuerungsverfahren wird die Wirk-Blindleistungsbilanz einer MS-Netzgruppe beeinflusst. Die heute übliche zeitliche Auflösung für Abrechnungswerte zwischen Netzbetreibern beträgt 15 Minuten. Um den 15-Minuten-Mittelwert der Blindleistungsbilanz beeinflussen zu können, muss eine auf diskreten Zeitschritten basierende Steuerung oder (Abtast-)Regelung von Blindleistungsquellen mit Zeitschritten kleiner 15 Minuten realisiert werden, denkbar sind z. B. 5- oder 10-Minutenmittelwerte, auf deren Basis der Blindleistungsbedarf bzw. der Blindleistungsabruf generiert wird. Zu beachten sind dabei die Anfahrzeiten bzw. Anfahrerrampen der Blindleistungsquellen, die den Blindleistungsabruf verzögern, aber gleichzeitig sprunghafte Blindleistungs- und Spannungsänderungen verhindern sollen.

3.5.2 Ausdehnung der Analysen auf weitere Spannungsebenen

Die im Abschnitt 3.2.2 vorgestellten Zusammenhänge zur Bestimmung der maximal abrufbaren Blindleistung aus Blindleistungsquellen im MS-Netz können sukzessiv auch auf die internen Netze (MS/NS- und NS-Ebene) von Blindleistungsquellen (z. B. MS-Betriebe mit BKA) ausgedehnt werden. Aus Sicht der Spannungshaltung sind diese allerdings nur „unabhängig/entkoppelt“ von der MS-Ebene zu berechnen, wenn eine Regeleinrichtung z. B. ein RONT vorhanden

ist. Ist dies nicht der Fall, so kann das freie Spannungsband im quelleninternen Stromnetz nicht in Gänze für die Blindleistungsbereitstellung verplant werden, da sich z. B. ein mit der kapazitiven Blindleistungsbereitstellung verbundener Spannungshub in der MS-Ebene auch in das Netz der Blindleistungsquelle durchsetzt.

3.5.3 Einflussbereiche der Blindleistungsquelle

Basierend auf den bestimmten Sensitivitätswerten kann der Einflussbereich einer Blindleistungsquelle identifiziert werden. Eindeutiger ist hierbei die Leistungssensitivität der Zweigelemente, da bei Netzmodellen mit HS/MS-Transformator und ggf. der vorgelagerten Netzebene die von der Blindleistungsquelle an ihnen hervorgerufene Spannungssensitivität mindestens an allen unterlagerten Netzknoten sichtbar ist. Zu beachten sind dabei mögliche Wechselwirkungen mit anderen Blindleistungsregleinrichtungen (siehe Abschnitt 3.5.4). Mit Hilfe der Einflussbereiche kann bewertet werden, ob sich Blindleistungsquellen überlappen und deshalb bei der Netz-Restriktionsanalyse Überlagerungseffekte zu berücksichtigen sind oder die Blindleistungsquellen einzeln für sich mit Hilfe der Netz-Sensitivitäts- und -Restriktionsanalyse bewertet werden können.

3.5.4 Wechselwirkung zwischen Blindleistungsabruf und spannungsabhängigem Verhalten von Lasten und Erzeugungsanlagen

Bei vorhandener Spannungsblindleistungsregelung von EZA kann es zu Dämpfungseffekten der Sensitivitätswerte kommen, wenn als Führungsgröße der EZA-Regelung die Spannung am NVP der EZA verwendet wird. Sofern die Regelkennlinie richtig implementiert ist, wird einer Spannungsanhebung durch induktiven Blindleistungseinsatz der EZA entgegengewirkt. Teilweise werden auch niedrige Spannungsniveaus mit kapazitiven Blindleistungseinsatz gestützt (siehe z. B. Regelkennlinie aus TAB-Ergänzung [28]). Wird Blindleistung zum Bilanzausgleich abgerufen, kann deren Wirkung durch die EZA verringert werden. Die entscheidenden Faktoren für die Höhe der resultierenden Dämpfung des Blindleistungsabrufs sind die Blindleistungsfähigkeit der EZA, sowie ggf. ein Regeltotband und die Steigung der Regelkennlinie. Im Beispielnetz Land_EZA konnten drei

verschiedene Zustände im Simulationsmodell beobachtet werden, die eine unterschiedliche Dämpfung nach sich ziehen:

1. Die EZA befindet sich im Regeltotband und setzt keine Blindleistung ein (keine Dämpfung).
2. Die EZA befindet sich außerhalb des Spannungstotbands und setzt Blindleistung ein. Die Blindleistung wird dabei von der wirkleistungsabhängigen Blindleistungsfähigkeit der EZA begrenzt (begrenzte Dämpfung).
3. Die EZA befindet sich außerhalb des Spannungstotbands und setzt Blindleistung ein. Die Blindleistung wird dabei nicht von der wirkleistungsabhängigen Blindleistungsfähigkeit der EZA begrenzt (maximale Dämpfung).

Die in der TAB-Ergänzung [28] beschriebene $\cos\varphi(U)$ -Kennlinie reduziert ab einer Spannungsgrenzwertüberschreitung den $\cos\varphi$ von 1,00 auf 0,90 binnen 0,02 p. u. Spannungsänderung. D. h. pro Spannungshub von 0,01 p. u. werden 25 % der aktuellen Wirkleistung (maximal 50 %) an induktiver Blindleistung bezogen. Höhe der Dämpfung und Häufigkeit der gedämpften Arbeitspunkte hängt von der Regelkennlinie der EZA, ihrer Blindleistungsfähigkeit und ihrem NVP ab.

Zur Abschätzung der Wechselwirkung wird die Spannungsänderung am NVP der EZA $\Delta U_{\text{NVP EZA}}$ nach Formel 3.36 benötigt, die aus dem Blindleistungsabruf aus einer Blindleistungsquelle ΔQ_{Quelle} resultiert. Über die Steigung $\frac{\Delta Q_{\text{EZA}}}{\Delta U_{\text{NVP EZA}}}$ der Kennlinie der Spannungsblindleistungsregelung kann über die berechnete Spannungsänderung am NVP der maximale¹⁵⁸ Blindleistungseinsatz der EZA ΔQ_{EZA} nach Formel 3.37 berechnet werden.

$$\Delta U_{\text{NVP EZA}} = \frac{\delta U_{\text{NVP EZA}}}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \cdot \Delta Q_{\text{Quelle}} \quad (3.36)$$

$$\Delta Q_{\text{EZA}} = \frac{\Delta Q_{\text{EZA}}}{\Delta U_{\text{NVP EZA}}} \cdot \Delta U_{\text{NVP EZA}} \quad (3.37)$$

Eine aufgrund der Spannungsabhängigkeit bedingte Wechselwirkung kann auch bei Lasten auftreten, weshalb sowohl Dämpfungs- als auch Verstärkungseffekte denkbar sind¹⁵⁹. Die auf einen Blindleistungsabruf resultierende normierte Dämpfung (Werte > 0) bzw. Verstärkung (Werte < 0) kann durch Formel 3.38 durch

¹⁵⁸Die Formel gilt nur außerhalb des Spannungstotbands ΔQ_{EZA} wird durch die Blindleistungsfähigkeit der EZA limitiert.

¹⁵⁹Das spannungsabhängige Verhalten von Lasten ist nicht zwangsläufig spannungsstützend.

Einsetzen von Formel 3.36 in Formel 3.37 berechnet werden. Aufgrund der Wirksamkeit und Planbarkeit eines Blindleistungsabrufs sollten Blindleistungsquellen mit hohen Abschwächungs- und Verstärkungseffekten nicht verwendet werden bzw. es sollte geprüft werden, ob die Spannungsblindleistungsregelung der verursachenden EZA notwendig ist.

$$\frac{\Delta Q_{\text{EZA}}}{\Delta Q_{\text{Quelle}}} \cdot 100 \% = \frac{\delta U_{\text{NVP EZA}}}{\delta Q_{\text{Quelle}}} \cdot \frac{\Delta Q_{\text{EZA}}}{\Delta U_{\text{NVP EZA}}} \quad (3.38)$$

Der Einfluss von EZA mit einer spannungsabhängigen Blindleistungsregelung kann direkt im Koordinationsalgorithmus abgebildet werden. Analog zum Einfluss der Zweigverluste (Formel 3.25a), ist wiederum eine iterative Abbildung notwendig. Formel 3.39a und 3.39b zeigen exemplarisch¹⁶⁰ die Berücksichtigung anhand der Randbedingung zur Einhaltung der oberen Spannungsbandgrenze. Benötigt werden die Knotensensitivitäten bezogen auf eine Blindleistungsänderung am NVP der jeweiligen z zu berücksichtigenden EZA sowie die sich ergebenden Blindleistungsarbeitspunkte. Für letztere wird zunächst, die durch den Blindleistungsabruf aus einer Blindleistungsquelle resultierende Spannungsänderung am NVP einer EZA bestimmt. Liegt die Summe der bislang am NVP aufgetretenen Spannung zuzüglich der Spannungsänderung außerhalb des Regeltotbands der EZA-Kennlinie, wird der entsprechende Blindleistungseinsatz der EZA berechnet¹⁶¹. Anschließend wird der Blindleistungsbedarf um den Blindleistungseinsatz der EZA korrigiert und der Vorgang solange wiederholt bis sich ein stabiler Arbeitspunkt einstellt oder eine Abbruchbedingung erfüllt wird. Je nach Verteilung der EZA und Blindleistungsquellen kann es sinnvoll sein, vorab die Dämpfung nach Formel 3.38 auszuwerten bzw. die maximale Korrektur der Blindleistungsbedarfs zu limitieren, da im schlechtesten Fall die EZA den Blindleistungsabruf kompensiert bzw. invertiert.

$$\sum_q^{q_{\max}} \frac{\delta U_{\max \text{ kor } i \ e}}{\delta Q_{\text{Quelle } q}} \cdot (-1 \cdot Q_{\text{Pot } q \ e}) \cdot x_{q \ e} \leq U_{\text{frei } i \ e} - \Delta U_{\text{EZA } i \ e} \quad (3.39a)$$

$$\Delta U_{\text{EZA } i \ e} = \sum_z^{z_{\max}} \frac{\delta U_{\max \text{ kor } i \ e}}{\delta Q_{\text{EZA } z}} \cdot (-1 \cdot Q_{\text{EZA } z}) \quad (3.39b)$$

¹⁶⁰ Auch hier ist die Arbeitspunktabhängigkeit der Sensitivitätswerte zu korrigieren. Die Randbedingungen der Betriebsmittelauslastung sind in Formel 3.28a analog anzupassen.

¹⁶¹ Bei wirkleistungsabhängiger Blindleistungsbereitstellung ist die maximale Wirkleistungseinspeisung der EZA innerhalb der Eingriffsklasse zu wählen.

EZA deren Blindleistung über Fernwirktechnik vorgebar ist, können analog zu Betrieben mit BKA, direkt als Blindleistungsquellen behandelt werden.

3.5.5 Definition von limitierenden Knoten- und Kantenelementen

Liegen die errechneten Werte der maximal abrufbaren Blindleistung nach Formel 3.9a bis 3.9d (Abschnitt 3.2.2.1) unter dem Wert des Blindleistungspotenzials Q_{Pot} der Blindleistungsquelle, so liegt eine Limitierung aufgrund der Netzrestriktionen vor. Knoten- und Kantenelemente, die eine Bedingungen nach Formel 3.40a bis 3.40d erfüllen, sind hierfür ausschlaggebend. Zur Bewertung eines ggf. notwendigen und sinnvollen Netzausbaus muss allerdings zusätzlich die Korrelation zwischen Blindleistungsbedarf und Blindleistungspotenzial einer Blindleistungsquelle berücksichtigt werden.

$$|Q_{\text{max kap Knoten } i}(w, \Delta t)| < |Q_{\text{Pot kap}}| \quad (3.40a)$$

$$|Q_{\text{max kap Zweig } m}(w, \Delta t)| < |Q_{\text{Pot kap}}| \quad (3.40b)$$

$$Q_{\text{max ind Knoten } i}(w, \Delta t) < Q_{\text{Pot ind}} \quad (3.40c)$$

$$Q_{\text{max ind Zweig } m}(w, \Delta t) < Q_{\text{Pot ind}} \quad (3.40d)$$

3.5.6 Datenbasis

Das entwickelte Steuerungsverfahren verwendet bekannte Arbeitspunkte eines Netzes, um je Eingriffsklasse einen zulässigen Blindleistungsabruf zu ermitteln. Die Aussagekraft der Bewertung je Eingriffsklasse hängt dabei stark von der zugrundeliegenden **Anzahl und Repräsentativität an Datenpunkten** ab. Bei Beispielnetz Stadt_Industrie reduziert sich an den Rändern der Wirk-Blindleistungsfläche die Anzahl n_t an auswertbaren Arbeitspunkten. In Abbildung 3.43 sind in grün Arbeitspunkte eingezeichnet, die in Eingriffsklassen mit mehr als 100 Arbeitspunkten liegen. Um die Ergebnisse des Verfahrens weiter abzusichern (neben der bereits umgesetzten Worst-Case-Betrachtung), wäre eine Ausweitung der Datenbasis, z. B. über die Betrachtung mehrerer Jahre, sinnvoll. Im Rahmen dieser Arbeit kann diese jedoch nicht umgesetzt werden, da die entsprechenden Eingangsdaten und Simulationsmodelle nicht verfügbar sind. Im Weiteren (d. h.

in Kapitel 4) wird deshalb keine Einschränkung von zulässigen Arbeitspunkten über die Anzahl an auswertbaren Messpunkten vorgenommen. Als weitere Gegenmaßnahme könnten die Grenzen der Eingriffsklassen vergrößert oder einzelne zusammengefasst werden (im Extremfall bis hin zu einer Worst-Case-Betrachtung über alle Arbeitspunkte).

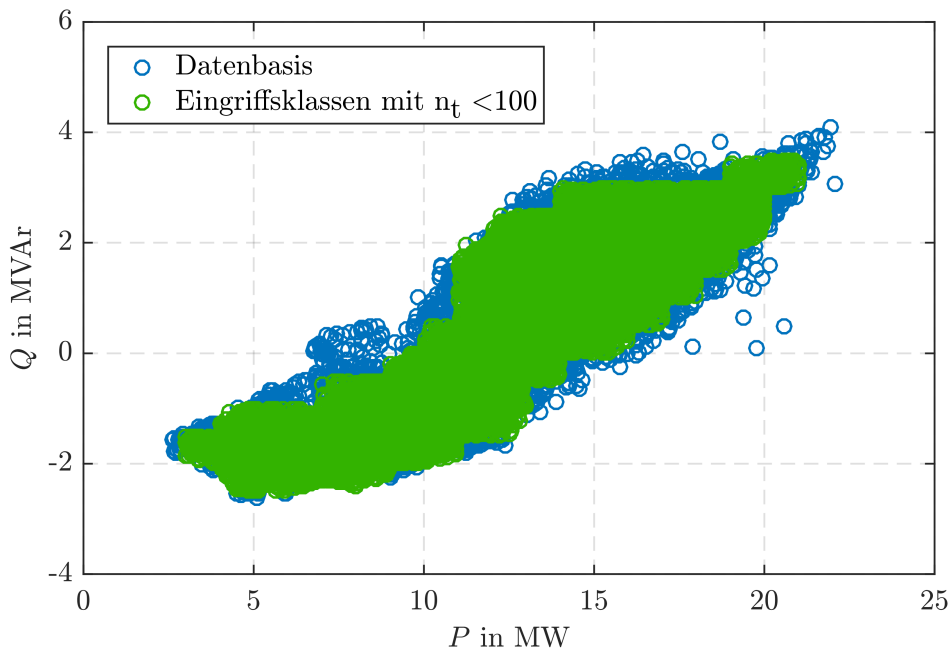


Abbildung 3.43: Wirk-Blindleistungsverhalten des Beispielnetzes Stadt_Industrie (blau im Hintergrund) mit Datenpunkten (grün), die in Eingriffsklassen mit mehr als 100 Arbeitspunkten liegen. Datenbasis bilden Simulationswerte in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres.

Ein weiterer Aspekt ist die **Zuordnung von Datenpunkten** zu einer Eingriffsklasse im Rahmen des Steuerungsverfahrens („Netzplanung“) und beim späteren Blindleistungsabruf („Netzführung“). Da das Wirk-Blindleistungsverhalten von MS-Netzen Schwankungen¹⁶² unterliegt, ist absehbar, dass die Zuordnung von Arbeitspunkten zu einer Eingriffsklasse und somit die dazugehörigen Strom- und Spannungsverhältnisse in der MS-Ebene variieren. Dabei verschieben sich Arbeitspunkte in bestehende oder in bislang noch nicht untersuchte Eingriffsklassen. Bei kleinen Schrittweiten der Eingriffsklassengrenzen kann in guter Näherung davon ausgegangen werden, dass sich angrenzende Bereiche nicht übermäßig voneinander unterscheiden und aufgrund der Worst-Case-Betrachtung ausreichend Sicherheitsreserven vorhanden sind. Ist eine größere Variation zu erwarten (z. B.

¹⁶²EZA und Lasten verhalten sich nicht von Jahr zu Jahr identisch.

bei sehr volatilem Verhalten von Kundenanlagen), muss die Schrittweite der Eingriffsklassengrenzen bereits bei der Bestimmung der Gewichtungsfaktoren ausreichend groß gewählt werden. Bei Netzen mit sehr volatilem Verhalten (z. B. mit hoher Einspeisung an WEA) kann das Steuerungsverfahren dennoch angewendet werden, jedoch sollten hier ausreichend große Eingriffsklassen¹⁶³ bzw. einzelne Worst-Case-Arbeitspunkte¹⁶⁴ als Bezugsbasis herangezogen werden. Über Arbeitspunkte in bislang noch nicht betrachteten Eingriffsklassen kann das Steuerungsverfahren keine Aussage über einen zulässigen Blindleistungsabruf treffen, weshalb prinzipiell kein Abruf zugelassen werden kann. Dies führt u. U. dazu, dass an Arbeitspunkten, die die Blindleistungsextrema definieren, keine reduzierende Wirkung über das Steuerverfahren erreicht werden kann. Durch eine ausreichend große Datenbasis (Betrachtung mehrerer Jahre über Mess- oder Simulationsdaten) kann solchen Situationen vorgebeugt werden. Ein alternativer Ansatz wäre die Ergänzung des „realen“ Ausgangsdatensatzes um zusätzliche „fiktive“ Arbeitspunkte im Simulationsmodell, die durch eine gezielte Variation von Netzparametern (z. B. Skalierung des Wirk- und Blindleistungsverhaltens von Lasten und EZA) eine Schar von Arbeitspunkten erzeugt, die die „realen“ Simulationswerte an kritischen Bereichen ergänzen bzw. „übertreffen“¹⁶⁵. Dieser szenarienbasierte Ansatz bietet den Vorteil, dass netzspezifische Korrelationen zwischen Lasten und Einspeisern erhalten bleiben.

3.6 Resultierende Thesen

Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen, Entwicklungen und Diskussionen werden folgende Thesen aufgestellt, die anhand der Anwendung des Steuerungsverfahrens auf ein reales MS-Netz im Rahmen von Simulation im Kapitel 4 überprüft werden sollen.

- **Sicherstellung von Strom- und Spannungsrestriktionen ohne Nachrüstung von Messtechnik in der MS-Ebene:** Mit Hilfe des entwickelten Steuerungsverfahrens können Blindleistungsquellen der MS-Ebene in ein Blindleistungsmanagement zur Blindleistungsbilanzoptimierung eingebunden werden, ohne hierfür die Messtechnik in der MS-Ebene im Vergleich

¹⁶³Im Extremfall ergibt sich eine Eingriffsklasse über alle Arbeitspunkte.

¹⁶⁴Auslegungsrelevant sind ggf. einzelne Arbeitspunkt, die in extremen Einspeise- und Starklastsituationen entstehen.

¹⁶⁵Durch eine Skalierung kann z. B. ein höherer Wirkleistungsbezug im Starklastfall erzeugt werden.

zum heutigen Stand auszubauen. Die Einhaltung von Strom- und Spannungsgrenzwerten wird hierbei über die im Steuerungsverfahren enthaltenen Netzplanungsansätze sichergestellt. U. a. werden Worst-Case-Szenarien je Eingriffs-klasse zur differenzierten Bewertung eines Blindleistungsabrufs betrachtet. Wesentliche Aspekte sind hierbei die Berücksichtigung der Arbeitspunktabhängigkeit der verwendeten Spannungs- und Leistungssensitivitätswerte und die spannungsebenenübergreifende Planung (HS/MS- und MS-Ebene).

- **Effiziente Nutzung von Blindleistungsquellen durch die Betrachtung von Eingriffs-klassen:** Das Verfahren bestimmt den zulässigen Blindleistungsabruf anhand Worst-Case-Szenarien für mehrere Eingriffs-klassen. Im Vergleich zur heute üblichen Auslegungspraxis mit zwei bis drei Auslegungsfällen ergibt sich hierdurch eine deutlich differenzierte Bewertung, wodurch der Zugriff auf Blindleistungsquellen bei verschiedenen Netzarbeitspunkten unterschiedlich und somit effizienter erfolgt.
- **Keine relevanten Verstärkungs-/Abschwächungseffekte durch Blindverluste der Netzbetriebsmittel der MS-Ebene:** Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen zur Auslastungsänderung der Netzbetriebsmittel durch einen Blindleistungsabruf in Abschnitt 2.4.4, wird mit keinen signifikanten Verstärkungs- oder Abschwächungseffekten eine Blindleistungsabrufs aus der MS-Ebene bezogen auf den Übergabepunkt zur HS/MS-Ebene gerechnet. Zu beachten sind allerdings u. U. Wechselwirkung mit anderen Blindleistungsquellen die z. B. zur Spannungshaltung eingesetzt werden (siehe Abschnitt 3.5.4).
- **Blindleistungspotenzial von Betrieben heute nur bedingt zur Blindleistungsbilanzminimierung geeignet:** MS-Betriebe mit BKA besitzen heute i. d. R. ein induktives Blindleistungspotenzial, das mit ihrer Wirkleistungsaufnahme korreliert. Das kapazitive Potenzial ist antikorreliert, weist allerdings aufgrund von meist vorhandenen Überkapazitäten der BKA eine anteilige durchgängige zeitliche Verfügbarkeit auf. Da das Blindleistungsverhalten von MS-Netzen i. d. R. bei hoher Wirkleistungsaufnahme/-Abgabe der Verbrauch/EZA induktiv und bei Schwachlast kapazitiv ist und das Wirkleistungsverhalten der Betriebe mit dem der Netzgruppe korreliert, wird erwartet, dass Betriebe induktive Arbeitspunkte der Netzgruppe verstärken oder abschwächen sowie kapazitive verstärken können.

Kapitel 4

Evaluierung des Steuerungsverfahrens anhand von Netzsimulationen

Das in Kapitel 3 entwickelte Steuerungsverfahren für den gleichzeitigen Blindleistungsabruf aus mehreren Blindleistungsquellen wird mittels Netzsimulationen in diesem Kapitel umgesetzt und anhand der Simulationsergebnisse evaluiert. Zur Anwendung kommt ein Netzmodell des Beispielnetzes Stadt_Industrie, das im Rahmen von [2] an der Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher (FENES) der OTH Regensburg entstanden ist. Dieses wird um geeignete Simulations- und Auswerteroutinen in den Programmen PowerFactory und MATLAB erweitert, um die Funktionalität des Steuerungsverfahrens umzusetzen und um die in Abschnitt 4.2 beschriebenen Szenarien auswerten zu können.

4.1 Beschreibung des verwendeten Netzmodells

Als fokussiertes MS-Netz wird das Beispielnetz Stadt_Industrie gewählt und im Rahmen dieser Arbeit erweitert, da diese bereits in [2] erstellt wurde sowie umfangreiche Eingangsdaten (z. B. Messdaten, Informationen zu Verbraucherstruktur) und reale Betriebe mit potenziellen Blindleistungspotenzial vorhanden sind (technische Eckdaten zur Netzgruppe sind im Anhang A.2 aufgeführt).

4.1.1 Netzstruktur

Das Netzmodell umfasst das detailliert abgebildete reale MS-Netz Stadt_Industrie, einen überlagerten HS-Ring mit einer Länge von ca. 31 km sowie weitere acht in der HS-Ebene angeschlossene MS-Netze. Letztere werden vereinfacht über Ersatzlasten und Messzeitreihen (Summenlast der Wirk- und Blindleistung am Transformator) an der Unterspannungsseite der HS/MS-Transformatoren nachgebildet. Beispielnetz Stadt_Industrie besitzt zwei „geschlossene Ringe“, siehe Abbildung 4.1. Die Ringtopologie wurde vom Netzbetreiber zum einen aufgrund der hohen Anzahl an MS-Kunden (linker Bereich mit ca. 20 km MS-Leitungslänge) und zum anderen wegen einer weitläufigen Versorgungsfläche (rechter Bereich mit ca. 70 km MS-Leitungslänge) gewählt. EZA sind vorhanden, jedoch besitzen diese keine Spannungsblindleistungsregelung, weshalb keine Wechselwirkungen beim Blindleistungsabruf geprüft werden müssen (siehe Abschnitt 3.5.4). Das MS-Netz Stadt_Industrie wird über einen 40-MVA-Transformator aus der HS-Ebene versorgt und besteht aus 130 Zweigelementen und 123 Kontenelementen. Der Stufenschalter des Transformators besitzt 28 Stufen zu je 1,7 %.

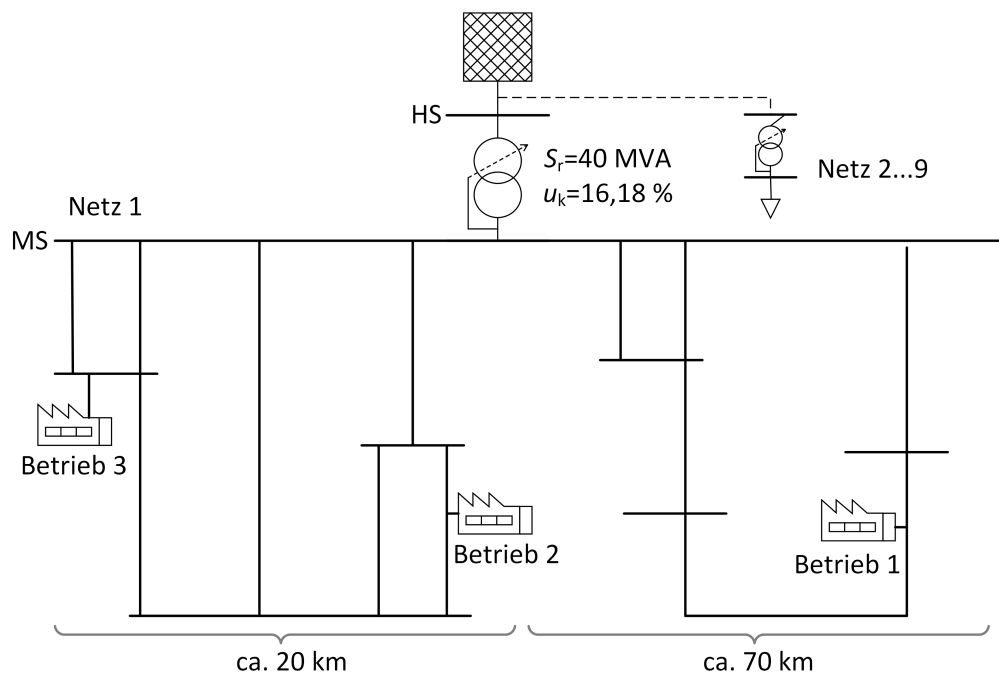


Abbildung 4.1: Netzschema von Beispielnetz Stadt_Industrie mit geschlossenen MS-Ringen und eingezeichneten Blindleistungsquellen sowie angedeuteten überlagerten HS-Ring.

4.1.2 Verhalten des Slack-Knotens

Das HS-Netz wird über einen „Slack-Knoten“ gespeist, an dem eine Messzeitreihe der 110-kV-Spannung hinterlegt ist. Der „Slack-Knoten“ befindet sich an der Oberspannungsseite des HS/MS-Transformators des MS-Netzes Stadt_Industrie und stellt den Übergabepunkt zum überlagerten Netzbetreiber dar. Abbildung 4.2 zeigt, dass sich für die Jahre 2014, 2015 und 2016 eine sehr gleichmäßige Verteilung des Spannungsniveaus einstellt und sich die Extrema kaum unterscheiden. Der im Referenzjahr 2015 ermittelte Spannungsfreiraum am Stufenschalter des HS/MS-Transformators könnte folglich auch auf das Folgejahr übertragen werden.

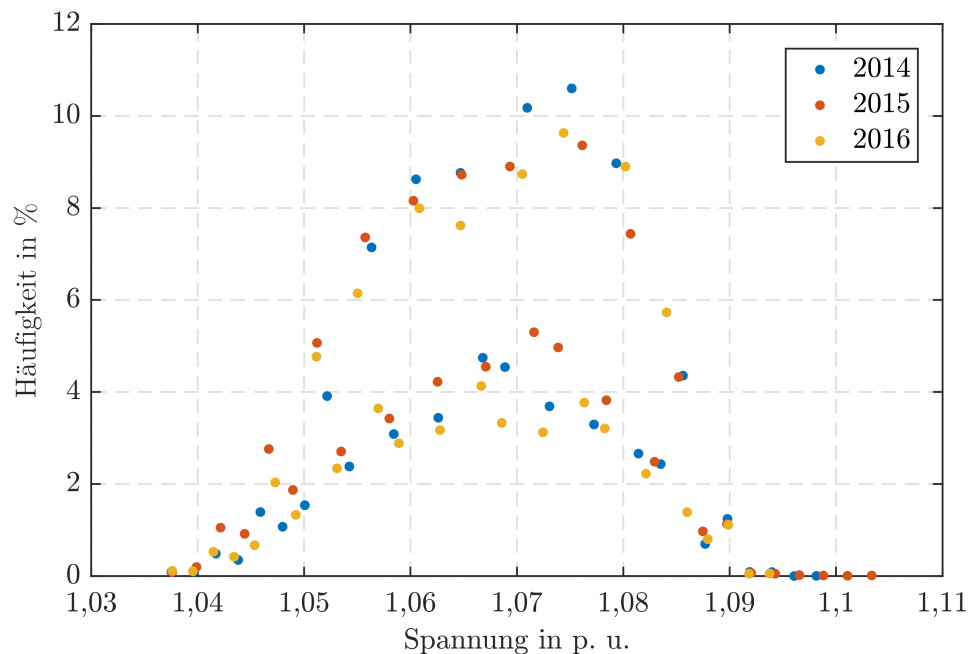


Abbildung 4.2: Häufigkeit der 110-kV-Spannung an der Oberspannungsseite des HS/MS-Transformators von Beispielnetz Stadt_Industrie, basierend auf 15-Minuten-Mittelwerten der Netzleitsystemmessung des Netzbetreibers für die Jahre 2014, 2015 und 2016.

4.1.3 Nachbildung von Lasten und Einspeisern

Die acht vereinfacht nachgebildeten MS-Netze werden in ihrem Wirk-Blindleistungsverhalten modelliert, d. h. als Summenlast¹⁶⁶ an der Unterspannungsseite

¹⁶⁶Wirk- und Blindleistungszeitreihe eines Jahres in Form von 15-Minuten-Mittelwerten, die über das Netzleitsystem des Netzbetreibers erhoben wurden.

des jeweiligen HS/MS-Transformators. Die Lasten und Einspeiser im betrachteten MS-Netz Stadt__Industrie werden in Form von Wirk- und Blindleistungszeitreihen mit einer diskreten Schrittweite von 15 Minuten für ein Jahr vorgegeben. Die Basis zur Ableitung der Zeitreihen bilden u. a. Messzeitreihen von Kunden mit RLM, Angaben zur installierten Erzeugungsleistung und Schleppzeigerwerte der Ortsnetzstationen (ONS).

4.1.4 Wirk-Blindleistungsverhalten der Netzgruppe Stadt__Industrie

Das Wirk-Blindleistungsverhalten der betrachteten Beispielnetzgruppe Stadt__Industrie ist in Abbildung 4.3 und 4.4 anhand von Extrema und Mittelwerten je $\frac{1}{4}$ -h-Wert einer Woche über die Jahre 2014, 2015 und 2016 dargestellt¹⁶⁷. Der Wochentagzyklus zwischen den Jahren ist nicht synchronisiert, dennoch zeigt allein die Betrachtung der anfänglichen Werkstage, dass die Extrema und Mittelwerte nur gering voneinander abweichen und somit gute Grundvoraussetzungen für die Anwendung des Steuerungsverfahrens gegeben sind.

¹⁶⁷Die verbleibenden acht MS-Netze werden nicht näher vorgestellt, da sie lediglich als für das Netzmodell notwendige Randlasten anzusehen sind, jedoch der Fokus der Untersuchungen auf der Auslegung eines einzelnen MS-Netzes liegt.

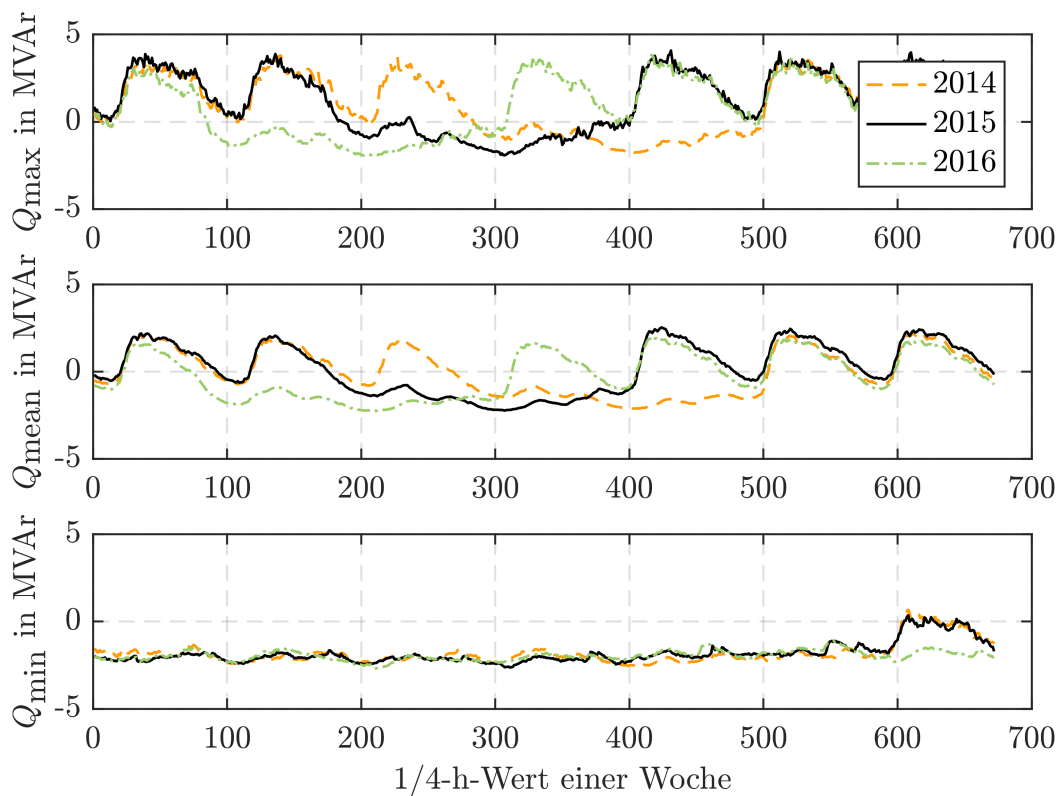


Abbildung 4.3: Blindleistungsverhalten der betrachteten MS-Netzgruppe Stadt_Industrie als Extrema und Mittelwerte je $\frac{1}{4}$ -h-Wert einer Woche über die Jahre 2014, 2015 und 2016. Datenbasis bilden Messwerte des Netzbetreibers in Form von 15-Minuten-Mittelwerten.

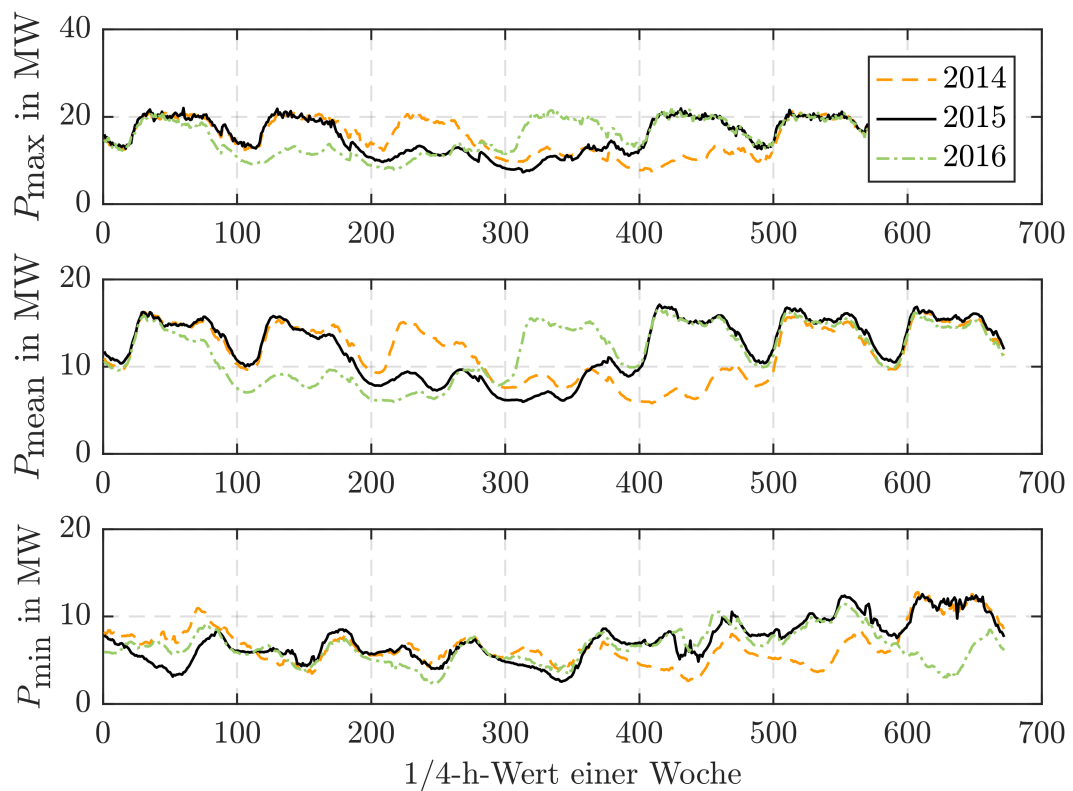


Abbildung 4.4: Wirkleistungsverhalten der betrachteten MS-Netzgruppe Stadt_Industrie als Extrema und Mittelwerte je $\frac{1}{4}$ -h-Wert einer Woche über die Jahre 2014, 2015 und 2016. Datenbasis bilden Messwerte des Netzbetreibers in Form von 15-Minuten-Mittelwerten.

Das Wirk-Blindleistungsdiagramm der Netzgruppe Stadt_Industrie wird in Abbildung 4.5 und 4.6 gezeigt. Anhand der eingefärbten Tagtypen, wird ersichtlich, dass sich die „Schwachlastarbeitspunkte“ (P kleiner 10 MW) primär durch Arbeitspunkte von Sonntagen und Samstagen ergeben. Werktage kennzeichnen vor allen den Stark- und Teillastbereich der Netzgruppe (P größer 10 MW). In dieser Darstellung sind alle Tage des Jahres enthalten, sodass es durch den Einfluss von Feiertagen und Urlaubszeiten zu Überlappungen zwischen den einzelnen Bereichen kommt (z. B. sind Werktage auch im Schwachlastbereich zu finden). Arbeitspunkte einer Eingriffsklasse können somit verschiedene Zustände der MS-Ebene darstellen, weshalb das resultierende Worst-Case-Szenario je Eingriffsklasse ausreichend Sicherheiten besitzt, da es die Extremwerte aller Arbeitspunkte verwendet.

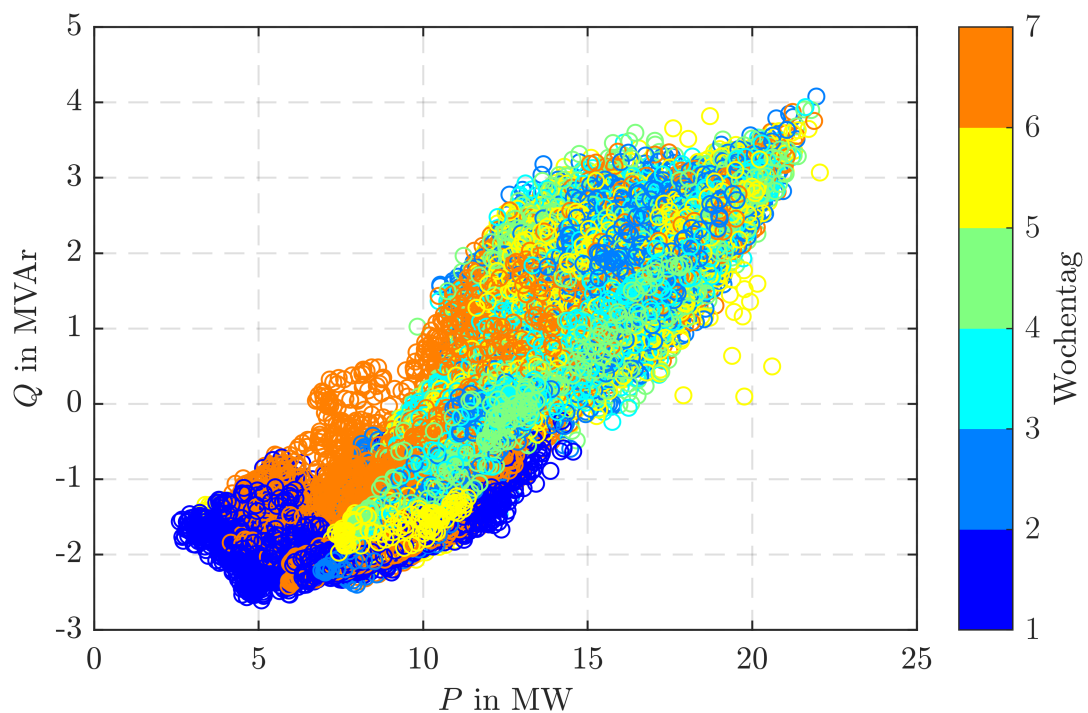


Abbildung 4.5: Wirk-Blindleistungsverhalten der Netzgruppe ohne Blindleistungsabruf Referenzjahr 2015 mit Einfärbung des Wochentagstyps (Tag 1 entspricht Sonntag „dunkelblau“). Datenbasis bilden Simulationswerte in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres.

In Abbildung 4.6 ist das Wirk-Blindleistungsverhalten der Netzgruppe mit Einfärbung der Stunde des Tages dargestellt. Auffällig ist, dass sich Starklastarbeitspunkte auch zu Nachtzeiten ergeben, was an der industriell geprägten Netzgruppe liegt, die auch nachts an Werktagen einen hohen Leistungsbezug aufweisen kann

(siehe auch P_{\max} in Abbildung 4.4).

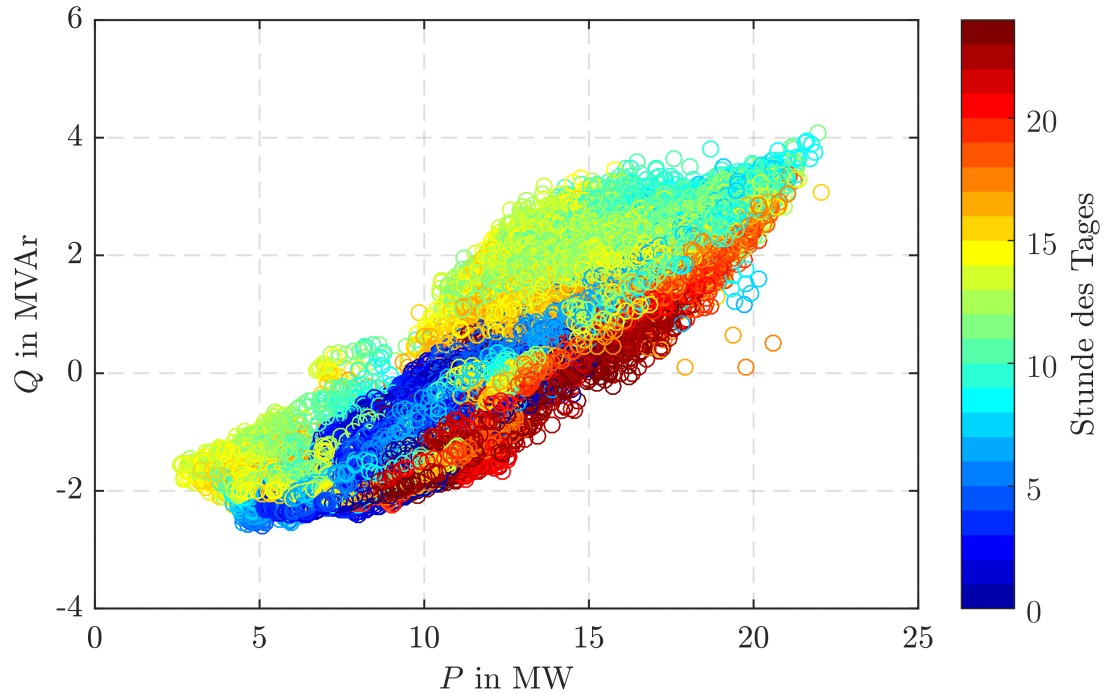


Abbildung 4.6: Wirk-Blindleistungsverhalten der Netzgruppe ohne Blindleistungsabruf Referenzjahr 2015 mit Einfärbung der Stunde des Tages. Datenbasis bilden Simulationswerte in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres.

4.1.5 Betrachtete Blindleistungsquellen

In der untersuchten real existierenden MS-Netzgruppe werden drei Betriebe an ihrem NVP in der MS-Ebene (d. h. im MS-Strang und nicht direkt am HS/MS-Transformator, siehe Abbildung 4.1) zur Bereitstellung von Blindleistung herangezogen. Die Auswahl erfolgt anhand der Größe der installierten Kompensationsleistung, die ein erstes Indiz für das zu erwartende Blindleistungspotenzial ist, das über die in Abschnitt 3.4 aufgestellte Prognosefunktion ermittelt wird. Ohne Beachtung der zeitlichen Korrelation ergibt sich in Summe über alle drei Betriebe ein maximales kapazitives Potenzial in Höhe von ca. 5 MVar und ein maximales induktives Potenzial von ca. 3,7 MVar. In Tabelle 4.1 sind verschiedene Kenngrößen der Betriebe aufgeführt.

Tabelle 4.1: Kenngrößen der drei in der Simulation verwendeten Betriebe.

Kenngröße	Betrieb 1	Betrieb 2	Betrieb 3
Branche	Papierverarbeitung	Maschinenbau	Metallverarbeitung und Maschinenbau
$\max(P)$ in MW	0,83	1,18	6,19
$\min(P)$ in MW	0,00	0,00	0,40
$\max(Q)$ in MVar	0,20	0,53	1,82
$\min(Q)$ in MVar	0,05	0,00	0,00
Q_{inst} in MVar	0,84	0,80	3,55
$\max(Q_{\text{Pot ind}})$ in MVar	0,41	0,36	2,94
$\min(Q_{\text{Pot ind}})$ in MVar	0,00	0,00	0,13
$\max(Q_{\text{Pot kap}})$ in MVar	-0,84	-0,80	-3,43
$\min(Q_{\text{Pot kap}})$ in MVar	-0,43	-0,44	-0,61
R_{KS} in Ω	3,40	1,54	0,59
X_{KS} in Ω	3,06	2,32	2,04
Z_{KS}^{168} in Ω	4,58	2,78	2,12

¹⁶⁸ Z_{KS} an der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators beträgt 1,79 Ω .

Das Wirk-Blindleistungsverhalten sowie das induktive und kapazitive Blindleistungspotenzial aller drei Betriebe/Blindleistungsquellen sind im Anhang A.13 dargestellt. Exemplarisch zeigt Abbildung 4.7 und 4.8 den Betrieb 3 (Extrema, 75-%- und 2-%-Perzentil sowie mittlere Werte je $\frac{1}{4}$ -Stunde einer Woche). Die Daten beziehen sich auf das Jahr 2015, das an einem Donnerstag beginnt. Der Leistungseinbruch in ca. der 180igten Viertelstunde kennzeichnet den Beginn des Wochenendes. Die eingezeichneten 25-%- und 75-%-Perzentilwerte zeigen, dass das Verhalten nur geringen Schwankungen unterliegt. Zu beachten ist, dass je $\frac{1}{4}$ -h-Wert nur 52 Werte verfügbar sind und damit statistische Aussagen nur bedingt möglich sind. Die in Abbildung A.28 im Anhang A.13 dargestellten Zeitverläufe der einzelnen Wochen des Jahres 2015 zeigen jedoch, dass man durchaus von einem „typischen“ und zyklischen Verhalten der Betriebe sprechen kann. Dieses wird nur durch einzelne Tage/Wochen (z. B. Feiertage und Urlaubszeiten) unterbrochen. Ohne hier den expliziten Nachweis zu erbringen, kann aufgrund von Untersuchungen in [2] bestätigt werden, dass sich dieses Verhalten nahezu identisch im Folgejahr fortsetzt und somit aufgrund der Dominanz der Betreibe auch die Leistungsflüsse im betrachteten MS-Netz ein wiederkehrendes Verhalten zeigen.

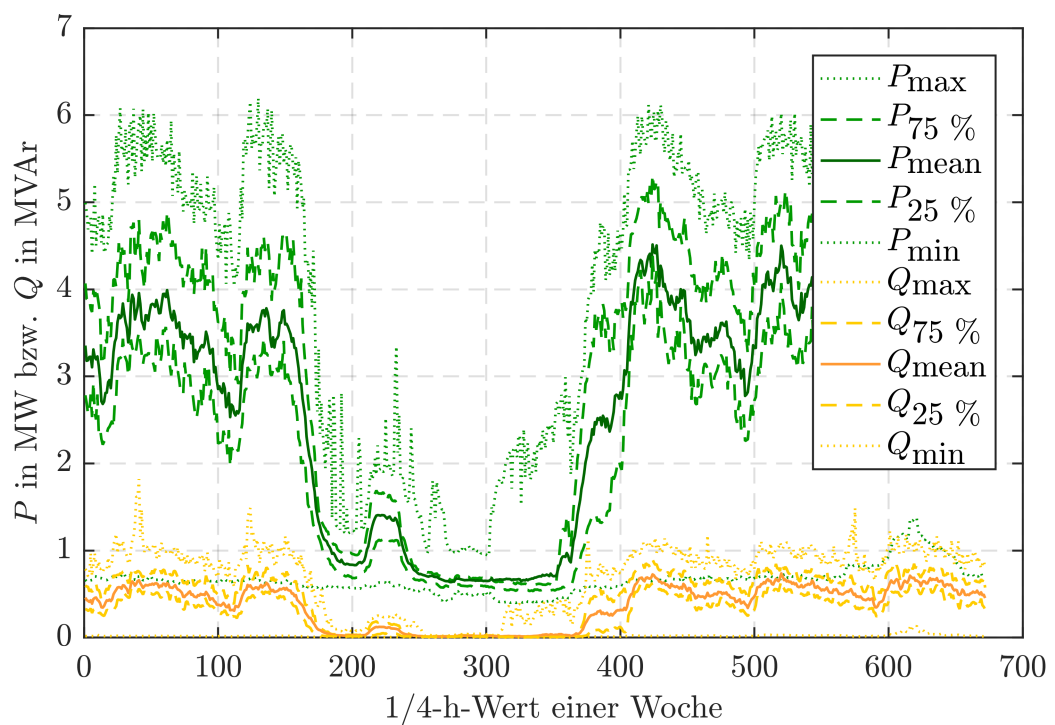


Abbildung 4.7: Extrema und Perzentilwerte des Wirk-Blindleistungsverhaltens von Betrieb 3. Datenbasis bilden Messdaten des Netzbetreibers zum Wirk-Blindleistungsverhalten des Betriebs in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres, über die das Potenzial abgeleitet wird.

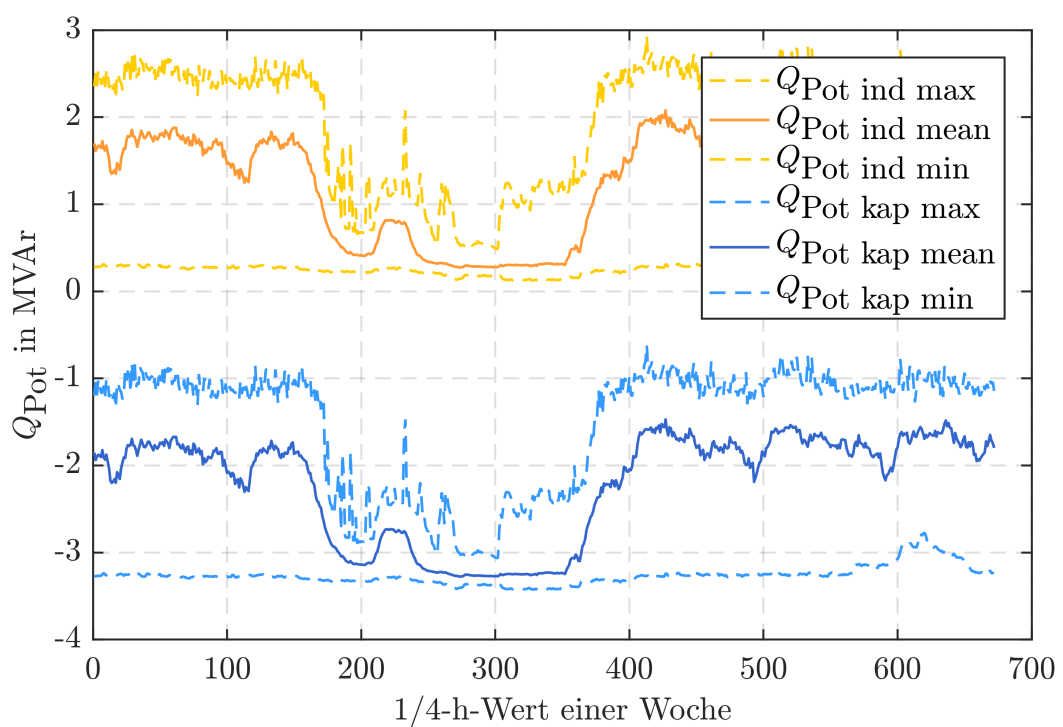


Abbildung 4.8: Extrema und Perzentilwerte des induktiven/kapazitiven Blindleistungspotenzials von Betrieb 3. Datenbasis bilden Messdaten des Netzbetreibers zum Wirk-Blindleistungsverhalten des Betriebs in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres, über die das Potenzial abgeleitet wird.

4.2 Beschreibung der Szenarien und der Randbedingungen der Simulation

Im Fokus der Evaluierung steht die durch das Steuerungsverfahren unterstellte Einhaltung von Spannungs- und Auslastungsrestriktionen, bei einem Abruf von Blindleistung aus Blindleistungsquellen mit Anschlusspunkt in der MS-Ebene. Zudem soll anhand einer weiteren Analyse das Potenzial von Betrieben mit BKA bezüglich eines Ausgleichs der Blindleistungsbilanz des MS-Netzes untersucht werden.

Zur Bestimmung der Steuerparameter wird ein „Trainingsdatensatz“, das Jahr 2015, verwendet (Szenario S1_0 und S2_0). Je nach Szenario ergeben sich unterschiedliche Gewichtungsfaktoren und maximal zulässige Blindleistungsabrufe je Eingriffsklasse. Variiert wird der Blindleistungssollwert und das verfügbare Blindleistungspotenzial der Blindleistungsquellen (Abschnitt 4.2.1). Die Festlegung der Eingriffsklassen sowie weitere Annahmen bzw. Randbedingungen der Simulation werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

Der eigentliche Abruf von Blindleistung bzw. die Evaluierung des Steuerungsverfahrens wird mittels eines unabhängigen Testdatensatzes aus dem Jahr 2016 durchgeführt. Bei der Überprüfung der Einhaltung von Spannungs- und Auslastungsrestriktionen (Szenario S1_1 und S1_2) wird ein Blindleistungssollwert von 10 MVar und ein durchgehend verfügbares Blindleistungspotenzial von ± 5 MVar je Quelle unterstellt. Beim Blindleistungsabruf wird in diesen Szenarien der berechnete Maximalwert je Eingriffsklasse verwendet. In Szenario S2_1 erfolgt die Bewertung des Potenzials von Betrieben mit BKA. Der Sollwert der Blindleistungsbilanz ist zu null gewählt und das Potenzial der Quellen ergibt sich anhand der erstellten Prognosefunktion. Tabelle 4.2 zeigt eine Übersicht aller Szenarien.

Tabelle 4.2: Beschreibung der Simulationsszenarien zur Evaluierung des Steuerungsverfahrens.

Szenario	Datensatz	Q_{Pot} ¹⁶⁹	Q_{Abruf} ¹⁷⁰	Q_{Soll} in MVar	Beschreibung
<i>Netzrestriktions-Szenarien:</i>					
S1_0	2015	5 MVar	0	10	Bestimmung von $q_{Q,q,e}$ „ohne“ Potenzialbegrenzung
S1_1	2015	5 MVar	1	10	Überprüfung des Steuerungsverfahrens nach S1_0 im Bezugsjahr der Gewichtungsfaktoren
S1_2	2016	5 MVar	1	10	Überprüfung des Steuerungsverfahrens nach S1_0 mittels unabhängigen Datensatz
<i>BKA-Szenarien:</i>					
S2_0	2015	mean	0	0	Bestimmung von $q_{Q,q,e}$ mit Potenzialbegrenzung
S2_1	2016	mean	1	0	Überprüfung des Steuerungsverfahrens nach S2_0 mittels unabhängigen Datensatz

¹⁶⁹mean: Mittelwert der Blindleistungsprognose der Datenpunkte einer Eingriffsklasse, 5 MVar: ± 5 MVar je Quelle

¹⁷⁰0: ohne Steuerungsverfahren, 1: Steuerungsverfahren

4.2.1 Blindleistungspotenzial und Blindleistungssollwert

Da ggf. das Blindleistungspotenzial den Blindleistungsabruf beschränkt, wird in Szenario S1_0 bis S1_2 ein durchgängig verfügbares induktives bzw. kapazitives Potenzial von 5 MVar für jeden der drei betrachteten Betriebe unterstellt. Weiter wird in diesen Simulationen ein Blindleistungssollwert von 10 MVar vorgegeben, um gezielt einen induktiven Blindleistungsabruf zu generieren, der aus Sicht der Arbeitspunktabhängigkeit der Sensitivitäten am kritischsten ist. Im Szenario S2_0 wird für das Blindleistungspotenzial der Blindleistungsquellen der Mittelwert der Potenzialwerte aller Arbeitspunkte je Eingriffsklasse verwendet, um ein „typisches“ Blindleistungspotenzial zu berücksichtigen¹⁷¹. Die Blindleistungspotenziale werden im Vorfeld über das in Abschnitt 3.4 beschriebene Modell ermittelt. Der Blindleistungssollwert ist mit 0 MVar vorgegeben, was einer lokalen Kompensation der Netzgruppe entspricht (siehe auch Diskussion in Abschnitt 3.2.3).

Der Blindleistungssollwert der Netzgruppe könnte dem Verfahren auch als Funktion der Wirkleistung oder als zulässiger Bereich übergeben werden. Bei letztem ergibt sich ein minimaler Blindleistungsabruf, wenn der Sollwert die „Ränder“ des zulässigen Bereichs beschreibt. Bei zeitdiskretem Vergleich von Soll- und Ist-Wert seitens der Netzführung ist zu beachten, dass mit einer Abweichung vom Sollwert gerechnet werden muss. Stehen weitere regelbare Blindleistungsquellen zur Verfügung, kann diese ggf. in Kauf genommen werden. Ist dies nicht der Fall, sollte der Sollwert in den zulässigen Bereich hinein verschoben werden.

4.2.2 Eingriffsklassen

Die Wirk- und Blindleistungsgrenzen der Eingriffsklassen sind über ein äquidistantes Raster mit einer Schrittweite von 0,5 MVar bzw. 1 MW festgelegt. Die Schrittweite der Blindleistungsgrenzen wird anhand des freien Spannungsbandes und der Spannungssensitivität definiert. Das freie Spannungsband beträgt über alle Berechnungspunkte und Knotenelemente hinweg ca. 0,01 p. u. Die maximale Spannungssensitivität der MS-Ebene beträgt ca. 0,004 p. u. je MVar. Durch eine Schrittweite von 0,5 MVar wird gewährleistet, dass eine Änderung des freien

¹⁷¹Um das „gesicherte“ Potenzial zu bewerten müsste ggf. das minimale, d. h. das gesicherte Potenzial, je Eingriffsklasse verwendet werden.

Spannungsbands in Höhe von maximal 20 % zwischen zwei Eingriffsklassen auftritt. Die Schrittweite der Wirkleistungsgrenzen wird zu 1 MW festgelegt, da die maximale Leitungsauslastung durch hohe Wirkleistungsflüsse dominiert wird und durch den gewählten Wert eine maximale Auslastungsänderung zwischen zwei Eingriffsklassen in Höhe von ca. 10 % der Bemessungsleistung der Zweigelemente auftreten kann (siehe auch Diskussion Abschnitt 3.3.2). Für die Beispielnetzgruppe ergeben sich 345 Eingriffsklassen, die in Abbildung 4.9 dargestellt sind. Für leere Eingriffsklassen (ohne Wirk-Blindleistungsarbeitspunkt) werden keine Gewichtungsfaktoren abgeleitet, da die notwendigen Bewertungsdaten fehlen. Die Eingriffsklassen sind in dieser Arbeit bewusst so feinteilig gewählt, da das primär limitierende freie Spannungsband bestmöglich ausgenutzt werden soll, um die korrekte Funktion des Steuerverfahrens zu testen.

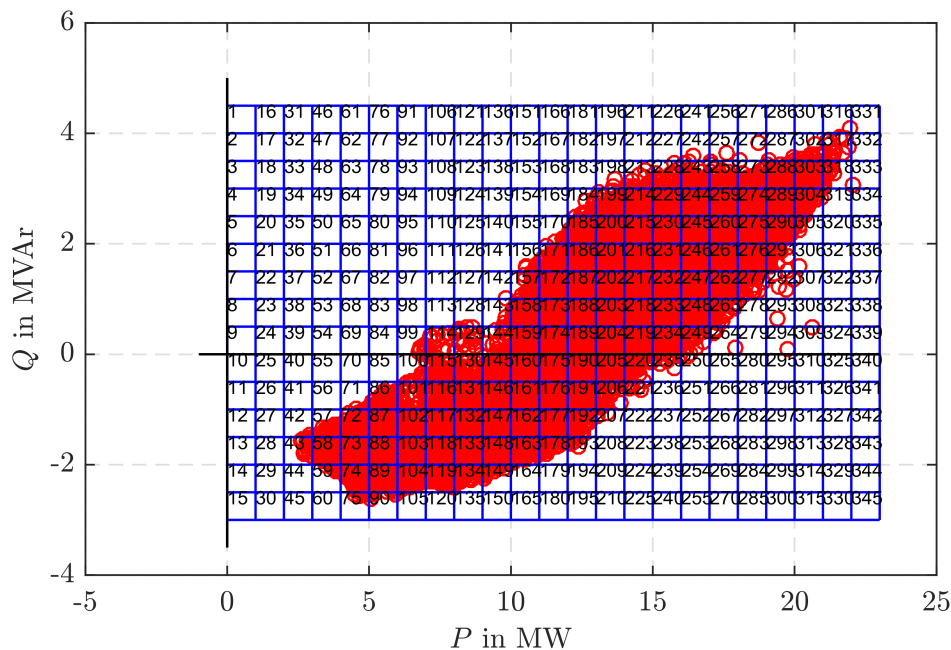


Abbildung 4.9: Wirk-Blindleistungsverhalten des betrachteten Netzes mit eingezeichneten 345 Eingriffsklassen (P -Schrittweite = 1 MW, Q -Schrittweite = 0,5 MVar). Datenbasis bilden Simulationswerte in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres.

4.2.3 Strom- und Spannungsgrenzwerte bzw. -Freiräume

Als Grenzwert für die Betriebsmittelauslastung wird ein Wert von 100 % der Bemessungsscheinleistung verwendet, um einen maximalen Einfluss auf die Blind-

leistungsbilanz sowie Spannungs- und Stromverhältnisse zu provozieren. Die Spannungsgrenzwerte könnten differenziert nach ONS und Kundenstationen festgelegt werden. In der Realität wird hiervon jedoch i. d. R. nicht Gebrauch gemacht (d. h. das Spannungsband an Kundenstationen wird planerisch nicht bis an die Grenzen der vereinbarten Übergabespannung ausgenutzt), weshalb in den folgenden Analysen Spannungsgrenzwerte in Höhe von 0,95 p. u. und 1,03 p. u. zugrunde gelegt werden. Als Grenzwerte für die HS-Ebene, d. h. für die Oberspannungsseite am HS/MS-Transformators, wird ein Bereich von 96 kV bis 123 kV gewählt. Eine HS-seitige Limitierung des Blindleistungsabrufs (z. B. aus Stabilitätsgründen im HS-Netz) wird nicht definiert.

Die Spannungs- und Auslastungsfreiräume sowie die Sensitivitätswerte der Zweig- und Knotenelemente werden anhand der Simulationsergebnisse von Szenario S1_0 bzw. S2_0 ermittelt.

4.2.4 Arbeitspunktabhängigkeit der Sensitivitätswerte

Als Korrekturwerte für die Arbeitspunktabhängigkeit der Sensitivitätswerte der MS-Netzelemente und für den unterspannungsseitigen Knoten am HS/MS-Transformator werden die in Tabelle 4.3 aufgeführten Werte verwendet. Trotz des Verkabelungsgrads von ca. 81 % werden für die MS-Ebene die Werte der Freileitung verwendet (Worst-Case). Die Herleitung der Werte kann Abschnitt 3.2 entnommen werden. Als Abbruchkriterium für die iterative Berechnung wird ein maximaler Schleifendurchlauf von 11 bzw. eine maximale Änderung je Gewichtungsfaktor von 5 % definiert.

Tabelle 4.3: Korrekturfaktoren zur Nachbildung der Arbeitspunktabhängigkeit der Sensitivitätswerte.

Kenngröße	Wert in $\frac{\%}{\text{MVA}_r}$
MS-Ebene:	
KF_{SeU}	5,0
KF_{SePv}	65,0
KF_{SeQv}	65,0
HS/MS-Transformator:	
KF_{SeU}	1,3
KF_{SePv}	9,0
KF_{SeQv}	9,0

4.2.5 Blindleistungsabruf

Wie in Abschnitt 3.1.1 erläutert, ist nicht die Entwicklung eines Abrufverfahrens für die Netzführung Schwerpunkt dieser Arbeit, weshalb dieses in der Simulation nur vereinfacht umgesetzt wird. Konkret bedeutet dies, dass der Blindleistungsabruf für den jeweiligen Arbeitspunkt nicht „online“ in der Simulation berechnet wird, sondern für jede Blindleistungsquelle im Vorfeld ein Blindleistungsfahrplan ermittelt wird. In der eigentlichen Simulation setzt die Blindleistungsquelle diesen Fahrplan um. Dieser vereinfachte Ansatz hat zur Folge, dass Änderungen der Blindleistungsbilanz durch eine abweichende Stufenschalterposition oder entstehende Netzverluste im Modell nicht berücksichtigt werden¹⁷². In der Realität würden diese den Istwert der Blindleistungsbilanz beeinflussen und somit in die Bedarfsermittlung deterministisch mit eingehen.

Ausgangsbasis zur Ableitung des Blindleistungsabrufs bildet die Wirk-Blindleistungsbilanz des MS-Netzes Stadt_Industrie aus dem jeweiligen Zieldatensatz¹⁷³. Jeder Arbeitspunkte wird zunächst einer Eingriffsklasse¹⁷⁴ anhand der Wirk- und Blindleistungsgrenzen zugeordnet. Ist keine passende Eingriffsklasse vorhanden

¹⁷²In Abschnitt 2.4.4 wird gezeigt, dass der Einfluss in der Größenordnung kleiner 100 kVar abzuschätzen ist und somit als vernachlässigbar für die Untersuchungszielsetzung angesehen wird.

¹⁷³Simulationenwerte des Jahres 2015 oder 2016 in einer Auflösung von 15-Minutenmittelwerten

¹⁷⁴Anzahl und Grenzen der Eingriffsklassen werden über den Trainingsdatensatz aus dem Jahr 2015 definiert.

oder ist im Trainingsdatensatz der Blindleistungsbedarf null¹⁷⁵, so kann für diesen Arbeitspunkt kein Blindleistungsabruf getätigt werden, da keine Gewichtungsfaktoren ermittelt wurden.

Besteht eine Eingriffsklasse, wird der Blindleistungsbedarf anhand von Soll- und Istwert der Blindleistungsbilanz ermittelt. Dieser wird ggf. auf den maximal zulässigen Blindleistungsabruf der Eingriffsklasse limitiert¹⁷⁶ und anhand der Gewichtungsfaktoren auf die Blindleistungsquellen verteilt. Diese setzen den Blindleistungsabruf um, wobei sie maximal das am Berechnungszeitpunkt verfügbare Potenzial einsetzen können¹⁷⁷.

Je Arbeitspunkt erfolgt somit nur eine einmalige Ermittlung des Blindleistungsabrufs und keine iterative Korrektur. Dies ist gleichzusetzen mit einem Abrufverfahren, das zu diskreten Zeitschritten, d. h. nicht kontinuierlich versucht die Blindleistungsbilanz der Netzgruppe auszugleichen, weshalb die realisierte Abruflogik für die Simulation auch als Abtastregelung bezeichnet werden könnte.

In Abschnitt 3.5.6 wird u. a. der Einfluss von Arbeitspunkten die in neuen Eingriffsklassen liegen (d. h. Eingriffsklassen in denen im Trainingsdatensatz keine Gewichtungsfaktoren bestimmt wurden) auf die Wirkung des Steuerungsverfahrens diskutiert. Um dies zu demonstrieren, wird ein aufgetretener Ausfall der Blindleistungsmessung (ca. 60 zusammenhängende Datenpunkte mit einem Blindleistungswert um null schwankend) im Testdatensatz 2016 nicht korrigiert, da dies auch in der Praxis auftreten kann. Da korrekte Wirkleistungswerte vorhanden sind, entstehen neue Arbeitspunkte, an denen kein Blindleistungsabruf möglich ist. Zusätzlich entstehen einige einzelne neue Arbeitspunkte an den Rändern des Wirk-Blindleistungsverhalten aufgrund eines schwankenden Last- und Einspeiseverhaltens.

¹⁷⁵Der Blindleistungsbedarf im Trainingsdatensatz kann null sein, wenn Blindleistungssollwert und -Istwert identisch sind oder wenn keine Arbeitspunkte in der Eingriffsklasse vorhanden sind.

¹⁷⁶In den Szenarien S1_1 und S1_2 wird immer der maximal zulässige Blindleistungsabruf verwendet.

¹⁷⁷In den Szenarien S1_1 und S1_2 beträgt dieses durchwegs ± 5 MVar und in Szenario S2_1 ergeben sich die Werte anhand der Prognosefunktion.

4.3 Diskussion der Simulationsergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Szenarien diskutiert.

4.3.1 Unbeeinflusster Zustand der Netzgruppe im Basisjahr

Dieser Abschnitt beschreibt das „normale“ Verhalten des MS-Netzes im Basisjahr 2015, d. h. das Verhalten ohne zusätzlichen Blindleistungsabruf aus den Blindleistungsquellen zum Ausgleich der Blindleistungsbilanz. Auf Basis dieses Datensatzes werden die Gewichtungsfaktoren für das betrachtete Folgejahr 2016 über das Steuerungsverfahren generiert.

Auslastungs- und Spannungsverhältnisse

Im betrachteten MS-Netz besteht über alle Zweigelemente hinweg ein Auslastungsfreiraum von ca. mindestens 40 % zum gewählten Grenzwert von 100 % (Abbildung A.31 im Anhang A.14).

Aufgrund der im Vergleich zu den Lasten geringen installierten EZA-Leistung kommt es zu keiner signifikanten Spannungsanhebung im Netz und die maximale Spannung liegt nahezu an allen Knoten bei ca. 1,01 p. u., was der oberen Schaltschwelle des Totbands der Stufenschalterregelung entspricht. Die minimal auftretende Spannung liegt bei ca. 0,96 p. u. Die angegebenen Werte sind bereits um den Einfluss des Totbands des Stufenschalters korrigiert, was sich vor allem bei den Spannungsminima auswirkt. Das freie Spannungsband beträgt über alle MS-Knoten und Berechnungspunkte hinweg ca. 0,01 p. u. für den induktiven bzw. ca. 0,02 p. u. für den kapazitiven Blindleistungsabruf (Abbildung A.32 im Anhang A.14). Der Knoten 1 beschreibt die Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators, an dem die Spannung um den Stufenschaltereinfluss korrigiert wird. Die Lage der Extrema (ca. 1,02 p. u. und 1,11 p. u.) der 110-kV-Spannung zeigen (Abbildung A.32 im Anhang A.14), dass sich dauerhaft ein „erhöhtes“ Spannungsniveau über 1,00 p. u. einstellt. Entsprechend ist das freie Spannungsband am HS/MS-Transformator für einen kapazitiven Blindleistungsabruf deutlich geringer als das für einen induktiven, da weniger Stufen des Stufenschalters verfügbar sind.

Sensitivitätswerte

Die Spannungssensitivität der Knotenelemente bezogen auf Betrieb 3 (siehe Abbildung 4.10) ist am NVP der Blindleistungsquelle (Knoten 46) am höchsten. Es ergeben sich durchgehend positive Sensitivitätswerte, die stabile Arbeitspunkte charakterisieren. Der Einfluss auf die Spannung liegt zwischen $0,0038 \frac{\text{p.u.}}{\text{MVA}_r}$ und $0,0046 \frac{\text{p.u.}}{\text{MVA}_r}$. Die maximale Spannungssensitivität mit einem Wert von $0,0073 \frac{\text{p.u.}}{\text{MVA}_r}$ erreicht Quelle 1, da diese die höchste Kurzschlussimpedanz aufweist¹⁷⁸. Zu berücksichtigen ist, dass die angegebenen Sensitivitätswerte die Impedanz vom „Slack-Knoten“ bis hin zum Anschlusspunkte der Blindleistungsquelle in der MS-Ebene beinhalten, d. h. das auch die Impedanz des HS/MS-Transformators enthalten ist¹⁷⁹. Trotzdem liegt der Maximalwert der ermittelten Sensitivität bei nur ca. zwei Drittel des in Abschnitt 3.2.1.3 bestimmten Werts, was für das dort verwendete Worst-Case-Modell spricht. Für die Bewertung der MS-Ebene wird für jeden Berechnungszeitpunkt die Sensitivität an der HS/MS-Ebene abgezogen, die bei ca. $0,0039 \frac{\text{p.u.}}{\text{MVA}_r}$ liegt. Das Verhältnis der resultierenden Werte zeigt deutlich, dass die differenzierte Bewertung der Spannungsebenen sinnvoll ist.

In Abbildung A.34 und A.35 Anhang A.14 sind die Extrema der Sensitivitätswerte der Wirk- und Blindleistungsflüsse und der Wirk- und Blindleistungsverluste der Zweigelemente bezogen auf den Betrieb bzw. die Blindleistungsquelle 3 dargestellt. Die Sensitivität der Wirkleistung (Fluss und Verluste) und Blindverluste an Zweigelementen liegt im Bereich von wenigen kW bzw. kVA_r je MVA_r Blindleistungsabruf. Zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren wäre folglich in diesem MS-Netz eine Vernachlässigung und damit eine Vereinfachung der Nebenbedingungen, Formel 3.28a in Abschnitt 3.3.4.2, möglich. Dennoch wird am „iterativen Ansatz“ festgehalten. Die Blindleistungsflusssensitivitäten liegen in der MS-Ebene¹⁸⁰ bei ca. $\pm 0,4 \frac{\text{MVA}_r}{\text{MVA}_r}$ (siehe Abbildung A.34 im Anhang A.14). Am HS/MS-Transformator liegt die Blindleistungsflusssensitivität bei ca. $\pm 1 \frac{\text{MVA}_r}{\text{MVA}_r}$ (dies ist auch bei den anderen beiden Blindleistungsquellen der Fall), was bedeutet, dass ein Blindleistungsabruf nahezu unverändert am Verknüpfungspunkt zur HS-Ebene ankommt (siehe Abbildung A.34 im Anhang A.14). Hiermit kann die in Abschnitt 2.4.4 aufgestellte These, dass bei heutigen Verhältnissen ein

¹⁷⁸Die Spannungs- und Leistungssensitivitäten bezogen auf Quelle 1 und 2 liegen in den gleichen Größenordnungen wie bei Quelle 3, weshalb diese nicht separat dargestellt werden.

¹⁷⁹Die Impedanz der HS-Ebene ist nicht enthalten, da der „Slack-Knoten“ direkt an der Oberspannungsseite des Transformators angeschlossen ist.

¹⁸⁰Das MS-Netz weist geschlossene Ringe auf, wodurch sich der Blindleistungsfluss aufteilt und deshalb Sensitivitätswerte kleiner eins entstehen.

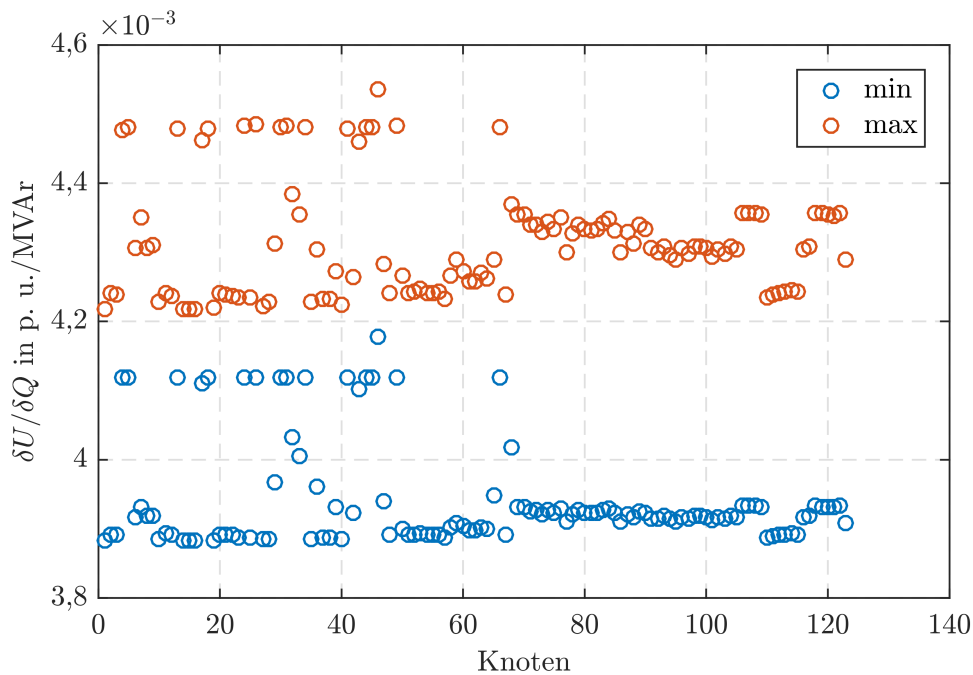


Abbildung 4.10: Sensitivitätswerte der Spannung an Knotenelementen bezogen auf eine Blindleistungsänderung am NVP von Betrieb 3.

Blindleistungsabruf aus der MS-Ebene ohne signifikante Verstärkungs- oder Abschwächungseffekte möglich ist, bestätigt werden.

4.3.2 Überprüfung der Einhaltung der Netzrestriktionen im Szenario S1_1

Über den in Abschnitt 3.3 beschriebenen Algorithmus zur Koordination des Blindleistungsabrufs aus mehreren Blindleistungsquellen werden die Gewichtungsfaktoren anhand der Simulationsergebnisse aus dem Referenzmodell (Trainingsdatensatz aus dem Jahr 2015) für jede Eingriffsklasse bestimmt. Anschließend wird eine Simulation mit dem ermittelten maximalen Blindleistungsabruf je Eingriffsklasse durchgeführt und die Einhaltung der Spannungs- und Stromgrenzen überprüft.

Blindleistungsabruf

Die resultierenden Werte der Gewichtungsfaktoren zeigt Abbildung 4.11. In Eingriffsklassen ohne Werte (z. B. kleiner 45) ist kein Blindleistungsbedarf vorhanden. In diesem Szenario besitzt jede Quelle zu jedem Zeitpunkt ein Blindleistungspotenzial von ± 5 MVar, sodass die Aufteilung des Blindleistungsabrufs

ausschließlich über die Einhaltung der Netzrestriktionen bedingt ist ($Q_{\text{Soll}} = 10 \text{ MVar}$, d. h. das Potenzial reicht zu jedem Zeitpunkt aus). Die Aufteilung der Werte in Richtung der aufsteigenden Eingriffsklassennummer zeigt, dass zunächst auf alle drei vorhandenen Blindleistungsquellen zugegriffen wird. Im weiteren Verlauf reduziert sich der Abruf aus den Quellen 2 und 3, bis bei hohen Eingriffsklassennummern primär aus Quelle 1 und 2 abgerufen wird. Durch Betrachtung der Eingriffsklassenaufteilung in Abbildung 4.9 und unter Berücksichtigung des Netzanschlusspunkts der Blindleistungsquelle (bzw. der Sensitivitäten der Blindleistungsquellen) kann dieses Verhalten nachvollzogen werden. Niedrige Eingriffsklassennummern beschreiben Schwachlastzeitpunkte der Netzgruppe (nachts oder an Wochenenden), an denen das Spannungsniveau in der MS-Ebene tendenziell höher liegt als bei Starklast (hohe Eingriffsklassennummern). Durch die größeren Spannungsfreiräume kann Blindleistung auch aus „tiefer“ im Netz angeschlossenen Blindleistungsquellen abgerufen werden. Dies zeigt sich auch an der maximal abrufbaren Blindleistung je Eingriffsklasse bezogen auf einen Sollwert von 10 MVar, die in Abbildung A.36 im Anhang A.15 dargestellt ist. Für die MS-Ebene ergibt sich ein Bereich von ca. 6 MVar bis 13 MVar und für die HS/MS-Ebene ein Bereich von 29 MVar bis 41 MVar. In die Betrachtung der MS-Ebene ist der Blindleistungsbedarf und das Potenzial der Blindleistungsquellen einbezogen. Die HS/MS-Ebene gibt lediglich einen theoretischen Bereich an, der nur das Vorzeichen des Bedarfs sowie ein uneingeschränktes Potenzial berücksichtigt. Deutlich wird, dass die MS-Ebene das limitierende Element ist. Die These, dass ein nach Eingriffsklassen und Spannungsebenen differenzierter Blindleistungsabruf effizienter ist als ein über alle Arbeitspunkte ermittelter¹⁸¹ kann bestätigt werden.

¹⁸¹ Würde eine Worst-Case-Betrachtung über alle Arbeitspunkte ausgeführt, würde sich ein noch kleinerer Wert als 6 MVar ergeben, da u. a. ein gleichzeitig minimales und maximales Spannungsniveau an Knotenelementen zu berücksichtigen wäre, deren Abstand sich deutlich zu der in den Eingriffsklassen auftretenden Spannungsspreizung unterscheiden würde.

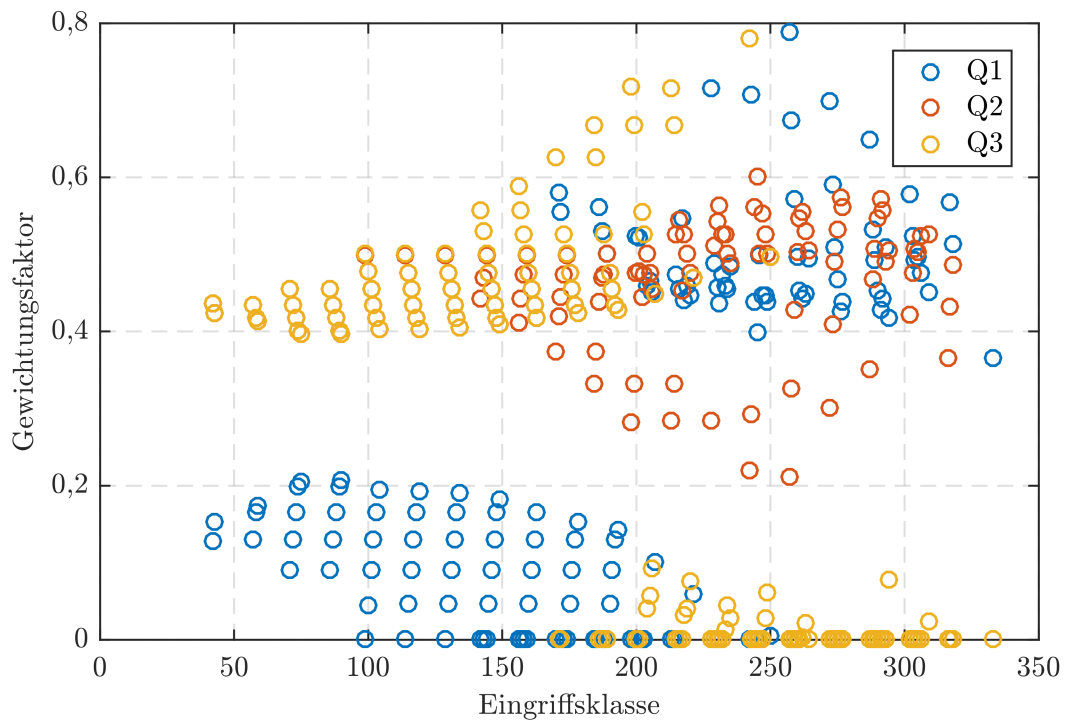


Abbildung 4.11: Gewichtungsfaktoren je Blindleistungsquelle und Eingriffs-
klasse.

In Abbildung 4.12 ist ein exemplarischer Blindleistungsabruf (Summe über alle drei Quellen) dargestellt. Der Ausschnitt beginnt an einem Sonntag, anschließend kommen die fünf Werktage und darauffolgend ein Wochenende. Der Blindleistungsabruf liegt an Wochenenden und nachts höher als an Werktagen bzw. tagsüber. Dies entspricht den Erwartungen, da bei hohen Leistungsbezug der Kundenanlagen in der MS-Ebene die Spannungsfreiräume abnehmen und die Leitungsauslastung zunimmt. Beide Parameter sind entscheidend für die Bestimmung des maximalen Blindleistungsabrufs und beschränken ihn. In den folgenden Abschnitten wird auf eine analoge Diskussion verzichtet, da hier die korrekte Funktion des Steuerungsverfahrens nachvollzogen werden konnte und sich zudem die gleichen Zusammenhänge ergeben.

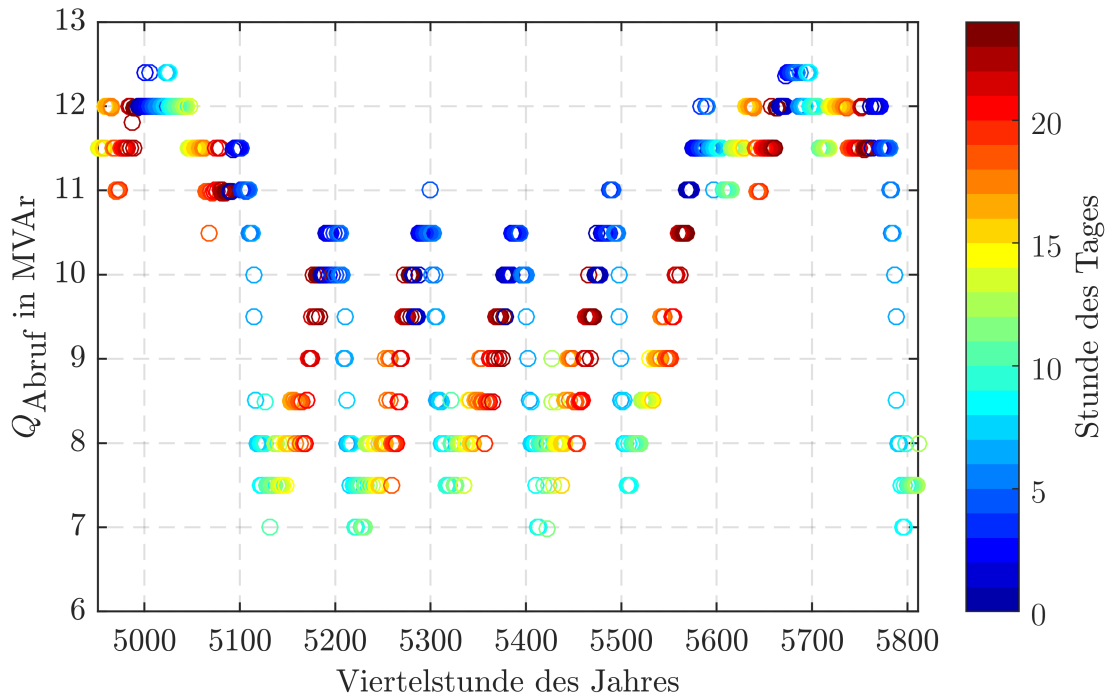


Abbildung 4.12: Exemplarischer Blindleistungsabruf über den Zeitraum von acht Tagen für das Referenzjahr 2015. Datenbasis bilden Simulationswerte in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres.

Im Zuge dieses Szenarios soll kurz auf die Stabilität bzw. das Konvergenzverhalten des Algorithmus eingegangen werden, da aufgrund des gewählten Sollwertes von 10 MVar ein hohes Maß an Blindleistung abgerufen wird und somit die Korrektur der Arbeitspunktsensitivität am höchsten ist. Von den maximal 11 zugelassenen Iterationsdurchläufen werden maximal neun benötigt. Ca. 95 % aller Eingriffs-klassen benötigen lediglich fünf Durchläufe. Die maximal zugelassene Änderung der Gewichtungsfaktoren beträgt 5 % was bezogen auf ein Potenzial von 5 MVar eine maximale Änderung von 250 kVar bedeutet. Bei Reduzierung dieser Schwelle würde sich die Anzahl an benötigten Durchläufen nicht zwangsläufig weiter erhöhen, da primär kleine Blindleistungsabrufe aus einer Blindleistungsquelle hohe relative Änderungen aufweisen.

Wirk-Blindleistungsbilanz

Die gewünschte Anhebung des Wirk-Blindleistungsverhaltens hin zu einem Sollwert von 10 MVar kann in Abbildung 4.13 betrachtet werden. Das Blindleistungsverhalten der Netzgruppe kann ausgehend vom kapazitiven Extrema von ca. -2,6 MVar auf einen neuen und induktiven Minimalwert von ca. 10 MVar angeho-

ben werden (Maximum liegt bei ca. 10,7 MVar). Der Sollwert wird an den meisten Arbeitspunkten überschritten, was auf den maximal möglichen Blindleistungsabruf je Eingriffsklasse und Verstärkungseffekte (hierauf wird im folgenden noch näher eingegangen) durch den Blindleistungsbedarf der Netzbetriebsmittel sowie die Umsetzung des Verfahrens im Rahmen der Netzführung als Abtastregelung zurückzuführen ist (siehe Diskussion in Abschnitt 4.2.5).

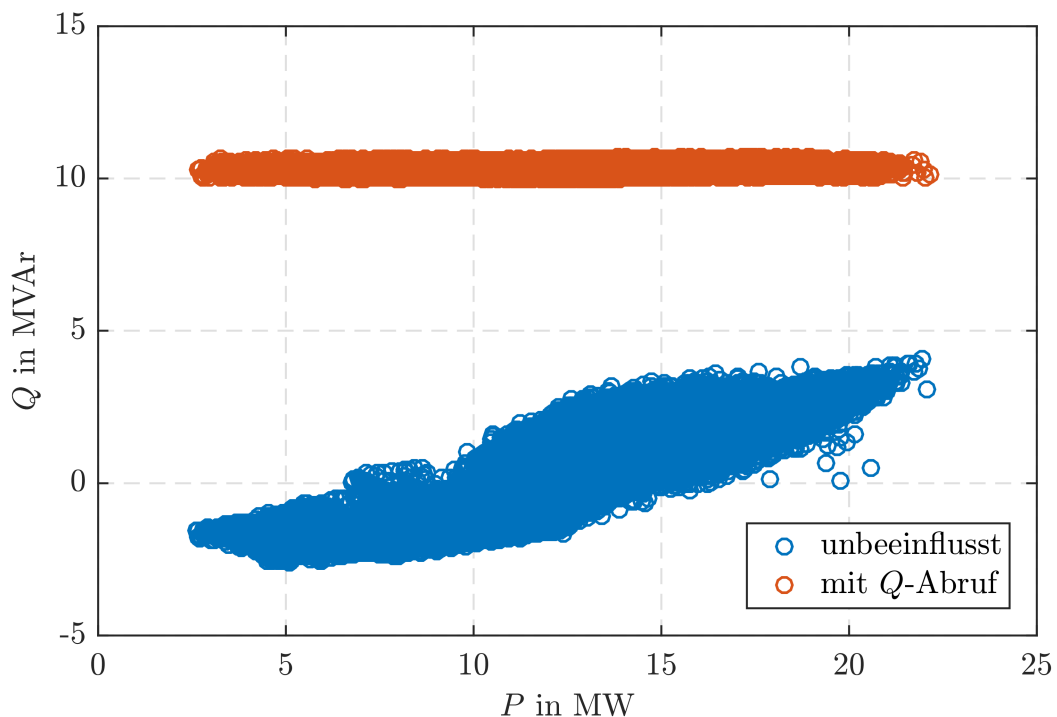


Abbildung 4.13: Wirk-Blindleistungsverhalten der Netzgruppe ohne und mit Blindleistungsabruf aus den Blindleistungsquellen für das Referenzjahr 2015. Datenbasis bilden Simulationswerte in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres.

Abbildung A.42 im Anhang A.15 zeigt das verbleibende Blindleistungsdefizit, das zwischen ca. -1 MVar und 0 MVar liegt, sowie die Änderung der Blindleistungsarbeitspunkte durch den Blindleistungsabruf (ca. 6 bis 13 MVar) und den Anteil der Blindleistungsänderung, der nicht über den Blindleistungsabruf, sondern über geänderte Netzverluste ($<|\pm 100 \text{ kVar}|$) resultiert. Die Änderung der Wirkleistungsarbeitspunkte liegt in der gleichen Größenordnung, womit die Verstärkungs- bzw. Abschwächungseffekte durch geänderte Leitungsauslastungen in diesem Netz in guter Näherung vernachlässigt werden können.

Spannungs- und Auslastungsverhältnisse

Spannungs- und Auslastungsgrenzen werden zu keinem Zeitpunkt verletzt, wie Abbildung A.37 und Abbildung A.38 im Anhang A.15 entnommen werden kann. Der Minimalwert der Spannung liegt bei 0,952 p. u., der Maximalwert der Auslastung bei 73 %. Die Auslastung der Zweigelemente erhöht sich bezogen auf die Nennleistung um maximal ca. 40 % (siehe Abbildung A.39 im Anhang A.15). Bei einer Vielzahl von Zweigelementen ergibt sich keine Auslastungsänderung, da sich der Blindleistungsabruf im Hinblick auf die Betriebsmittelauslastung primär auf die Zweigelemente, die elektrisch zwischen der Blindleistungsquelle und dem „Slack-Knoten“ liegen, auswirkt. Die Spannungsextrema über alle Arbeitspunkte der MS-Ebene sinken um maximal ca. 0,012 p. u., die der HS-Ebene um ca. 0,05 p. u. Betrachtet man die Bandbreite der auftretenden Spannungsänderungen je Arbeitspunkt, so ergibt sich für die MS-Ebene ein Einfluss von ca. -0,03 p. u. bis ca. 0,02 p. u. und für die HS-Ebene von ca. -0,05 p. u. bis ca. 0,005 p. u. (siehe Abbildung A.40 und Abbildung A.41 im Anhang A.15).

4.3.3 Überprüfung der Einhaltung der Netzrestriktionen im Szenario S1_2

Im Szenario S1_2 werden die im Szenario S1_0 ermittelten Gewichtungsfaktoren auf einen unabhängigen Testdatensatz angewendet. Das Netzmodell wird dafür mittels Daten (Einspeise- und Lastzeitreihen) aus dem Jahr 2016 aufgebaut.

Wirk-Blindleistungsbilanz

Abbildung 4.14 zeigt den Einfluss des Blindleistungsabrufs auf das Wirk-Blindleistungsverhalten der Netzgruppe. Wie erwartet verschiebt sich das Verhalten hin zum Sollwert von 10 MVar. Ca. 120 Arbeitspunkte¹⁸² (ca. 0,3 % aller betrachteten Arbeitspunkte) sind unverändert, d. h. deckungsgleich mit dem unbeeinflussten Datensatz (in Legende mit „neue Eingriffsklasse“ gekennzeichnet). An diesen Arbeitspunkten greift die in Abschnitt 3.3.1 aufgestellte Bedingung, dass ein Blindleistungsabruf nur zulässig ist, wenn der Arbeitspunkt in einer Eingriffsklasse liegt, in der im Trainingsdatensatz ein Blindleistungsbedarf ermittelt wurde. Neben den bewusst generierten Ausreißern auf der Blindleistungsnulllinie

¹⁸²Ca. 60 Arbeitspunkte wurden im Vorfeld bewusst erzeugt, um den Einfluss zu sicher demonstrieren zu können, siehe Abschnitt 4.2.5.

gibt es weitere unbeeinflusste Arbeitspunkte, die in den Eingriffsklassen 278 und 279 („neue Eingriffsklasse-Arbeitspunkte“ mit I. Quadrant) sowie in Eingriffsklasse 85 („neue Eingriffsklasse-Arbeitspunkte“ im II. Quadrant) liegen, da im Referenzdatensatz keine Arbeitspunkte in diesen Eingriffsklassen vorhanden waren (vergleiche Abbildung 4.9 in Abschnitt 4.2.2). Einer der Arbeitspunkte auf der Blindleistungsnulllinie konnte dennoch beeinflusst werden, da dieser in Eingriffsklasse 294 liegt und im Ausgangsdatensatz ein zulässiger Blindleistungsabruf berechnet wurde. Hiermit bestätigt sich die Erwartung, dass aufgrund von Arbeitspunktschwankungen das Verfahren an den Rändern des Wirk-Blindleistungsverhaltens limitiert wird (siehe Abschnitt 3.5.6). Unter Vernachlässigung der nicht beeinflussbaren Arbeitspunkte, kann das Blindleistungsverhalten der Netzgruppe ausgehend vom kapazitiven Extrema von ca. -2,6 MVar auf einen neuen und induktiven Minimalwert von ca. 10 MVar angehoben werden (mit Ausreißer auf einen Wert von ca. -0,4 MVar). Die Differenz zwischen geplanten Blindleistungsabruf und tatsächlich aufgetretener Blindleistungsänderung fällt analog zu Szenario S1_1 vernachlässigbar gering aus ($<|\pm 100 \text{ kVar}|$).

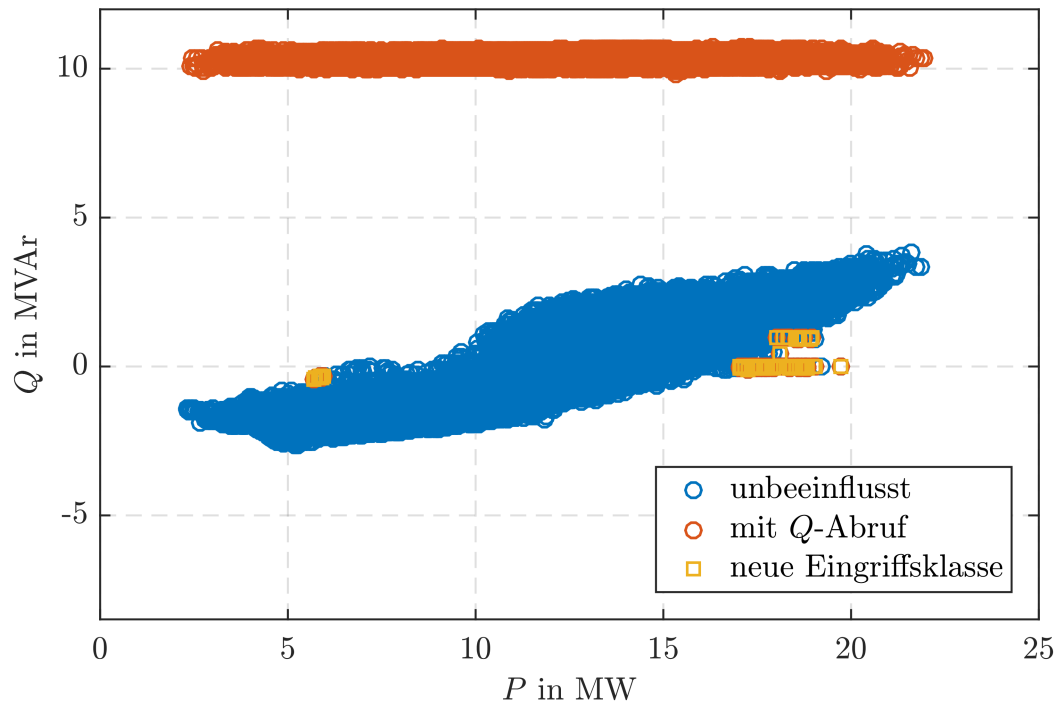


Abbildung 4.14: Wirk-Blindleistungsverhalten der Netzgruppe ohne und mit Blindleistungsabruf aus den Blindleistungsquellen für den unabhängigen Datensatz „Jahr 2016“. Datenbasis bilden Simulationswerte in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres. Hervorgehoben sind Arbeitspunkte in neuen, d. h. im Referenzdatensatz noch nicht belegten, Eingriffsklassen.

Aufgrund der Limitierung des Verfahrens an den Rändern erhöht sich das Blindleistungsdefizit von ca. -1 MVar bis ca. 0 MVar in Szenario S1_1, auf nun ca. -1 MVar bis ca. 10 MVar (siehe Abbildung 4.15), trotz nach wie vor verfügbaren Blindleistungspotenzial von 15 MVar.

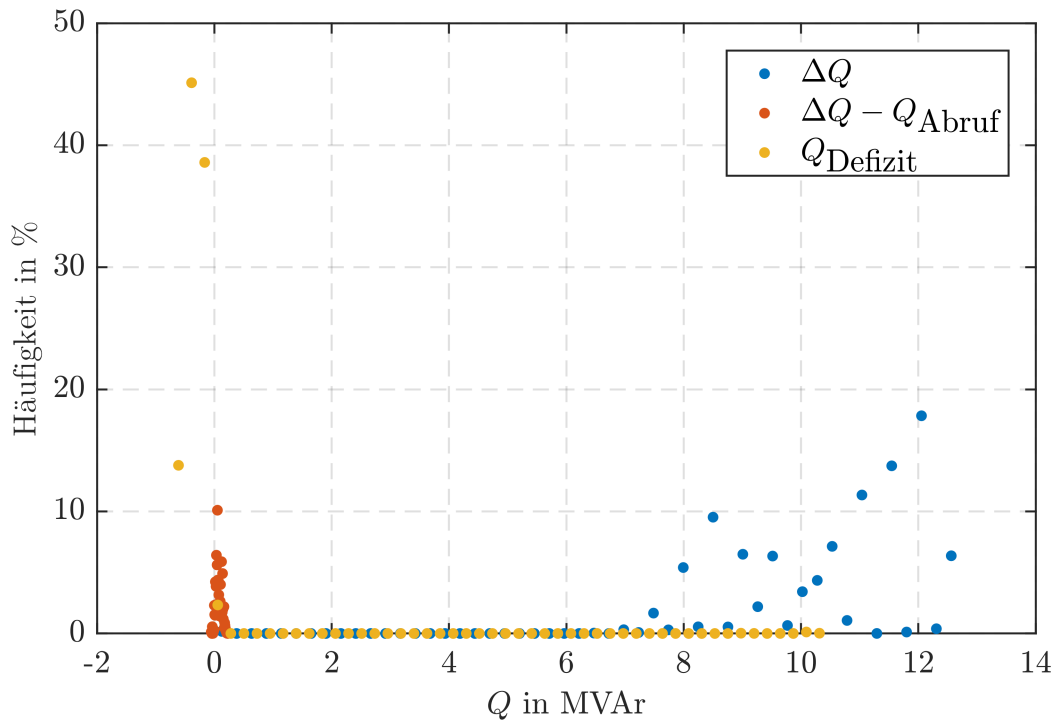


Abbildung 4.15: Häufigkeit verschiedener Wertebereiche der Blindleistungsänderung, der Abweichung der Blindleistungsänderung zum geplanten Blindleistungsabruf und des resultierenden Blindleistungsdefizits.

Spannungs- und Auslastungsverhältnisse

Grundsätzlich können die gleichen Aussagen wie im Szenario S1_1 getroffen werden, d. h. es kommt zu keiner Über- bzw. Unterschreitung von Auslastungs- und Spannungsgrenzen. Die Zweige der MS-Ebene weisen eine maximale Auslastung von 80 % auf. Die maximale Auslastungsänderung beträgt ca. 40 %. Siehe Abbildung A.44 und A.45 im Anhang A.16

Die Spannungsextrema an den Knoten betragen einschließlich korrigiertem Totbandeinfluss 0,95 p. u. bzw. 1,01 p. u. Das Spannungsminimum wird an einem Netzknoten in der Nähe der Blindleistungsquelle 1 erreicht. Die Spannungsextrema über alle Zeitpunkte sinken maximal um ca. 0,01 p. u. in der MS-Ebene und um ca. 0,04 p. u. in der HS-Ebene ab. Abbildung A.43 und A.46 im Anhang A.16 zeigen die zugehörigen Grafiken.

Abbildung 4.16 zeigt die kumulierte Häufigkeit der Spannungsniveaus aller MS-Knoten für alle Berechnungszeitpunkte. Ein Spannungswert kleiner oder gleich 0,96 p. u. weisen lediglich 5 % aller Datenpunkte auf. Die Korrektur des Tot-

bandeinflusses ist dabei bereits berücksichtigt. Weiter kann Abbildung 4.16 entnommen werden, dass das Spannungsband über 1,01 p. u. an allen Netzknoten ungenutzt ist. In diesem Netz würde es sich deshalb anbieten, den Spannungssollwert der Stufenschalterregelung und damit die Lage des Totbands zu erhöhen, um Freiräume/Sicherheiten für einen induktiven Blindleistungsabruf zu generieren.

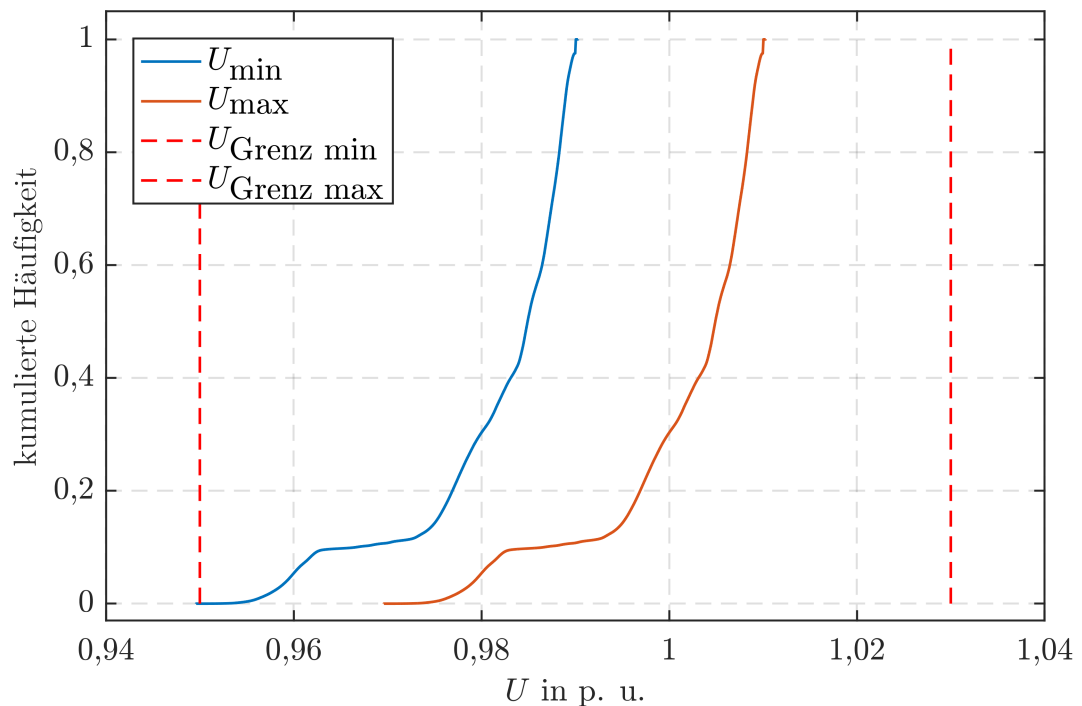


Abbildung 4.16: Kumulierte Häufigkeit der Spannungswerte aller Netzknoten und Berechnungszeitpunkte mit korrigierten Totbandeinfluss des Stufenschalters.

Das Spannungsminimum wird in Eingriffs-klasse 317 erreicht, die in guter Näherung den „Starklastfall“ der Netzgruppe beschreibt. Bei diesem stellen sich die minimalen Spannungswerte im unbeeinflussten Zustand der Netzgruppe ein, die durch den induktiven Blindleistungsabruf weiter abgesenkt werden. Die betroffenen Eingriffs-klasse enthält lediglich 16 Arbeitspunkte im Trainingsdatensatz und liegt am Rand des Wirk-Blindleistungsverhaltens (siehe Abbildung 4.17). Wie in Abschnitt 3.5.6 diskutiert, führt dies zur größten Unsicherheit beim Blindleistungsabruf, was im Rahmen der Evaluierung somit bestätigt werden kann. Mögliche Maßnahmen zur weiteren Absicherung der „Ränder“ werden ebenfalls in Abschnitt 3.5.6 erläutert.

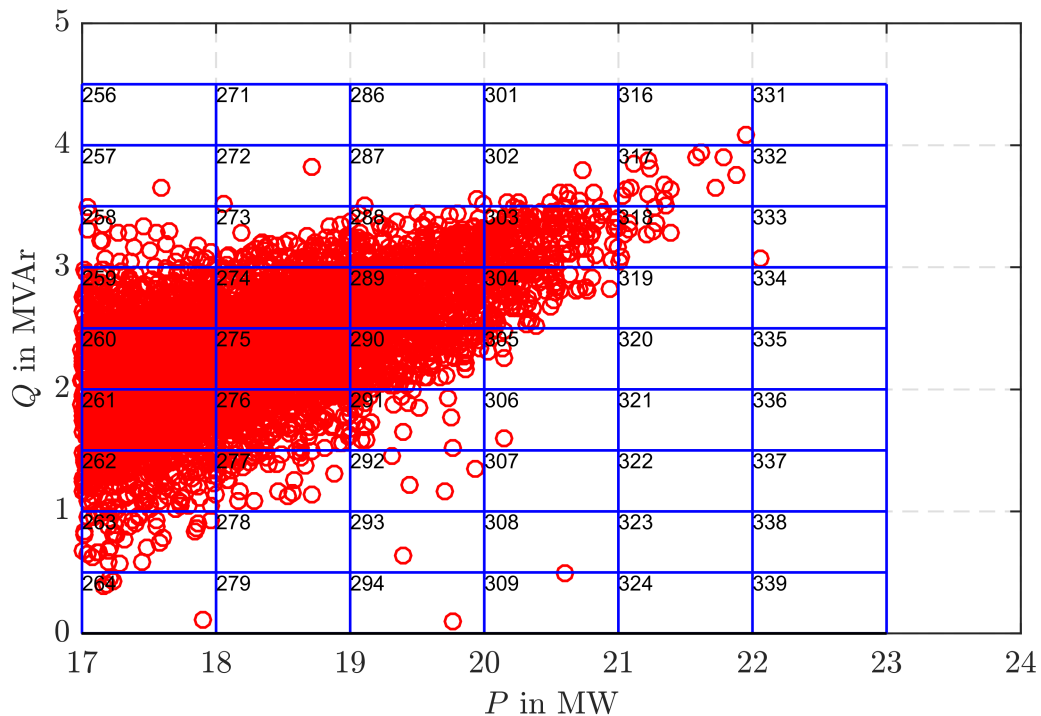


Abbildung 4.17: Wirk-Blindleistungsdiagramm des MS-Netzes mit Zoom auf Eingriffsklasse 317.

4.3.4 Potenzialbewertung der MS-Betriebe mit BKA im Szenario S2_1

Unter Verwendung der Prognosefunktion aus Abschnitt 3.4 zur Bestimmung des Blindleistungspotenzials der Betriebe und anhand eines Blindleistungssollwerts von 0 MVar wird in Szenario S2_1 der Beitrag von Betrieben zur Blindleistungsbilanzoptimierung exemplarisch untersucht.

Wirk-Blindleistungsbilanz

Aufgrund des zeitlich durchgängig verfügbaren kapazitiven Blindleistungspotenzials der Betriebe (mindestens ca. 1,5 MVar) kann vor allem das Wirk-Blindleistungsverhalten der MS-Netzgruppe im 1. Quadranten beeinflusst werden, was sich deutlich in Abbildung 4.18 widerspiegelt. Das minimal verfügbare induktive Potenzial in Höhe von ca. 130 kVar führt auch zu einer Verbesserung im 4. Quadranten. Das kapazitive Extrema in Höhe von ca. -2,65 MVar kann um ca. 250 kVar auf ca. -2,40 MVar angehoben werden.

Analog zu Szenario S1_2 tritt die Limitierung des Blindleistungsabrufs an 120 Ar-

beitspunkten¹⁸³ auf (in Legende mit „neue Eingriffsklasse“ gekennzeichnet). Im Vergleich zu Szenario S1_2 wird deutlich, dass die Relevanz der Limitierungen stark von der Sollwertvorgabe und vom Blindleistungspotenzial der Quellen abhängt. Waren im Szenario S1_2 noch nahezu alle 120 Arbeitspunkte betroffen, so sind es in diesem Beispiel weniger als 20 Punkte, die außerhalb des neuen Arbeitsbereichs der Netzgruppe („rote Fläche“) liegen und sich somit nachteilig auswirken.

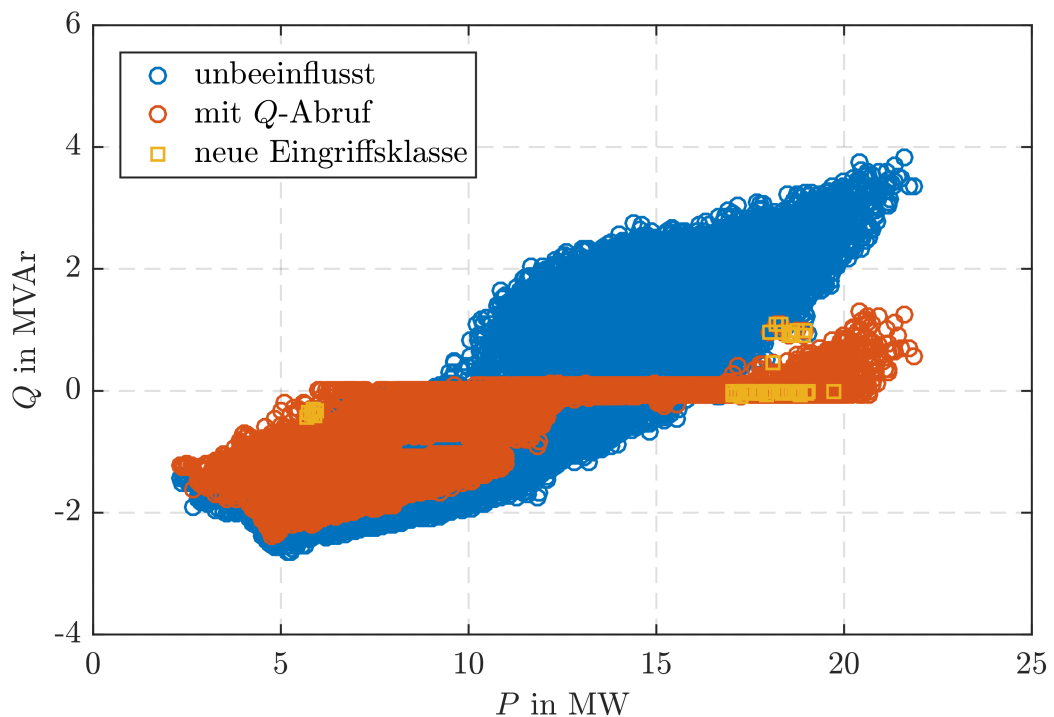


Abbildung 4.18: Wirk-Blindleistungsverhalten der Netzgruppe ohne und mit Blindleistungsabruf aus den Blindleistungsquellen für den unabhängigen Datensatz „Jahr 2016“. Datenbasis bilden Simulationswerte in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres. Hervorgehoben sind Arbeitspunkte in neuen, d. h. im Referenzdatensatz noch nicht belegten Eingriffsklassen.

Der gewählte Sollwert von 0 MVar wird zu keinem Zeitpunkt erreicht, da Verstärkungs- und Abschwächungseffekte der Zweigverluste nicht ausgeglichen werden. Ein Bereich um plus oder minus 100 kVar um den Sollwert wird in ca. 61 % aller Berechnungszeitpunkte erreicht. Ausschlaggebend für den immer noch geringen Anteil ist hauptsächlich das zu geringe Potenzial der Blindleistungsquellen, wes-

¹⁸³Ca. 60 Arbeitspunkte wurden im Vorfeld bewusst erzeugt, um den Einfluss sicher demonstrieren zu können, siehe Abschnitt 4.2.5.

halb ca. 1 % größer $Q_{\text{Soll}} + 100 \text{ kVAr}$ und ca. 39 % kleiner als $Q_{\text{Soll}} - 100 \text{ kVAr}$ sind, siehe Abbildung 4.19.

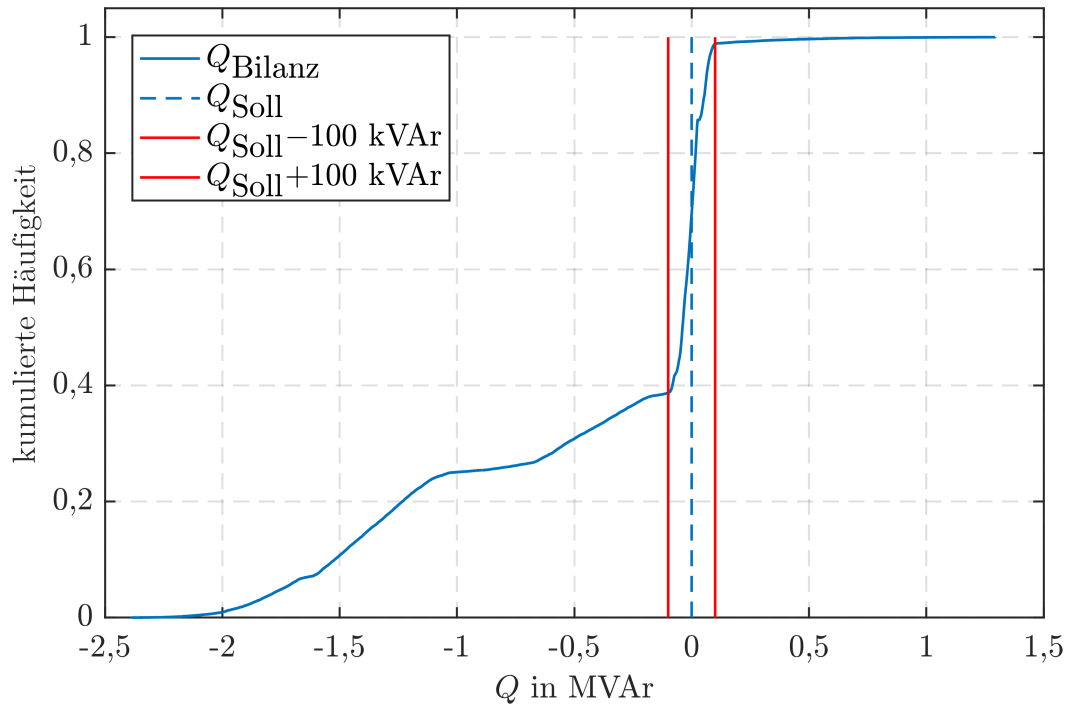


Abbildung 4.19: Kumulierte Häufigkeit der Blindleistungsbilanzwerte mit einem Blindleistungsabruf aus den drei Quellen.

Abbildung 4.20 zeigt die resultierende Änderung des Blindleistungsverhaltens (ca. -3 bis 1 MVar), die vernachlässigbare Abweichung der Blindleistungsänderung gegenüber dem geplanten Blindleistungsabruf ($< |\pm 100 \text{ kVAr}|$) und das verbleibende Blindleistungsdefizit (ca. -1,5 bis 2,5 MVar).

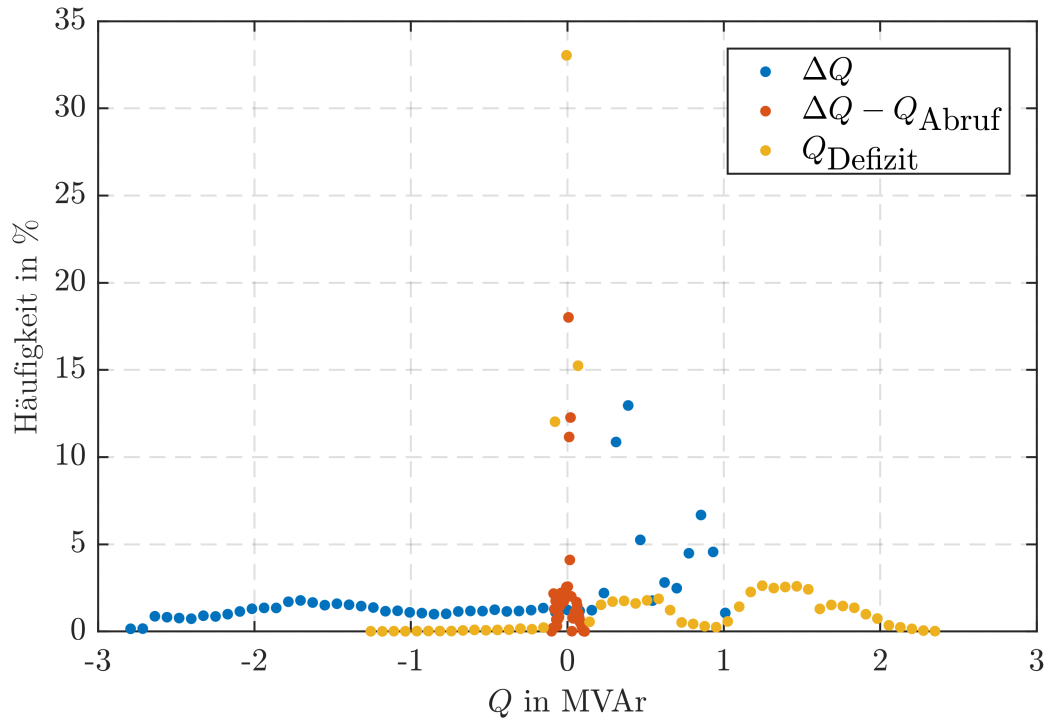


Abbildung 4.20: Häufigkeit verschiedener Wertebereiche der Blindleistungsänderung, der Abweichung der Blindleistungsänderung zum geplanten Blindleistungsabruf und des resultierenden Blindleistungsdefizits.

Spannungs- und Auslastungsverhältnisse

Die Simulationsergebnisse zeigen keine Verletzung von Auslastungs- und Spannungsgrenzen. Die maximale Auslastung der Zweigelemente über alle Arbeitspunkte hinweg wird durch den getätigten Blindleistungsabruf nur minimal beeinflusst (kleiner $|\pm 1,5 \text{ \%}|$, siehe Abbildung A.49 in Anhang A.17). Der größte reduzierende Effekt wird hierbei am HS/MS-Transformator erzielt, da der Blindleistungsfluss über diesen mittels des Blindleistungsabrufs aus den drei Blindleistungsquellen minimiert wird. Der Einfluss auf die Spannungsextrema der Knotenelemente nimmt im Vergleich zu Szenario S1_2 deutlich ab und beträgt nur noch maximal ca. 0,01 p. u. in der HS-Ebene und ist kleiner oder gleich $|\pm 0,002 \text{ p. u.}|$ in der MS-Ebene. Die Werte der Auslastungs- und Spannungsextrema sowie deren Änderungen sind in Abbildung A.47 bis Abbildung A.50 im Anhang A.17 je Knoten- bzw. Zweigelement dargestellt.

Blindleistungsabruf aus den Blindleistungsquellen

Abbildung 4.21 stellt, analog wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben, die maximal abrufbare Blindleistung je Eingriffs-klasse für die HS/MS- und MS-Ebene dar. Für die MS-Ebene ergibt sich ein Bereich von von ca. -4 MVar bis ca. 1 MVar und für die HS/MS-Ebene ein Bereich von ca. -23 MVar bis ca. 41 MVar. Die Vorzeichensprünge ergeben sich durch den jeweiligen Bedarf und die Nummerierung der Eingriffs-klassen. Auch in diesem Szenario zeigt sich keine Limitierung des Blindleistungsabrufs durch die HS/MS-Ebene. Die im Vergleich zu Szenario S1_2 deutlich geringeren zulässigen Blindleistungsabrufe der MS-Ebene sind auf das reduzierte Potenzial der Blindleistungsquellen zurückzuführen, da sich der maximal zulässige Blindleistungsabruf einer Eingriffs-klasse aus dem Minimum von Blindleistungsbedarf und abgerufener Blindleistung im Trainingsdatensatz ergibt.

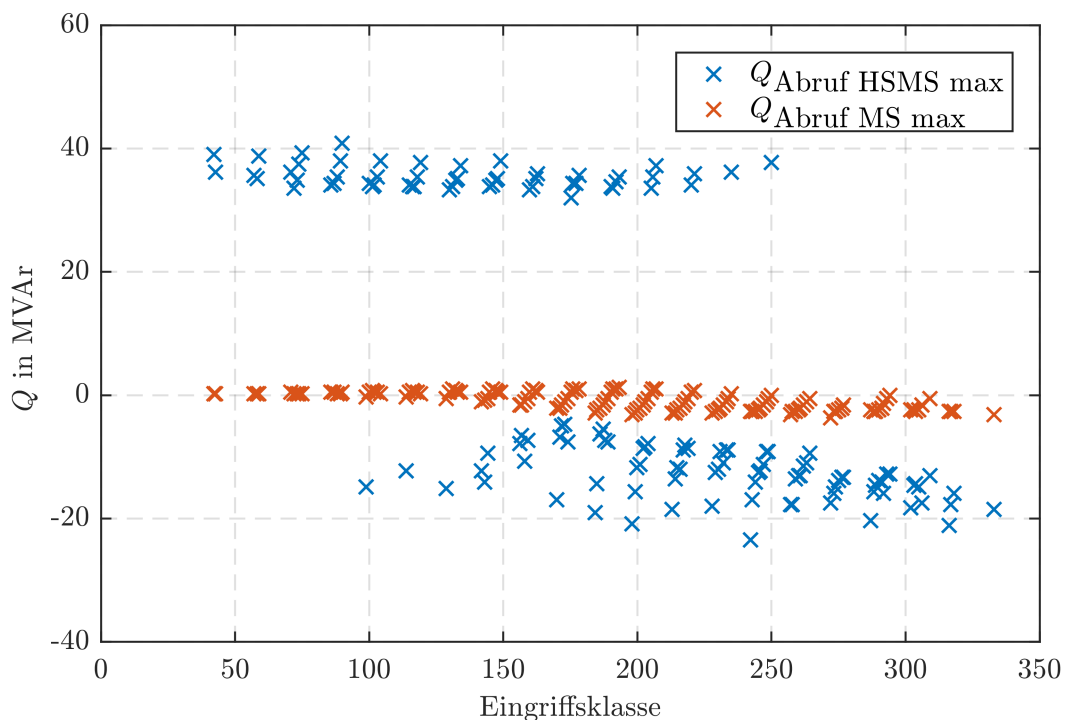


Abbildung 4.21: Maximal abrufbare Blindleistung je Eingriffs-klasse.

Eine Übersicht über den zeitlichen Verlauf des Blindleistungsabrufs aus den drei Blindleistungsquellen zeigt Abbildung 4.22. In dieser sind die Extrema und die Mittelwerte des Blindleistungsabrufs je $\frac{1}{4}$ -h-Wert einer Woche über alle Wochen eines Jahres dargestellt. Nachts und am Wochenende¹⁸⁴ wird induktives Potenzial

¹⁸⁴Das Wochenende entspricht den $\frac{1}{4}$ -h-Werten von ca. 100 bis 300.

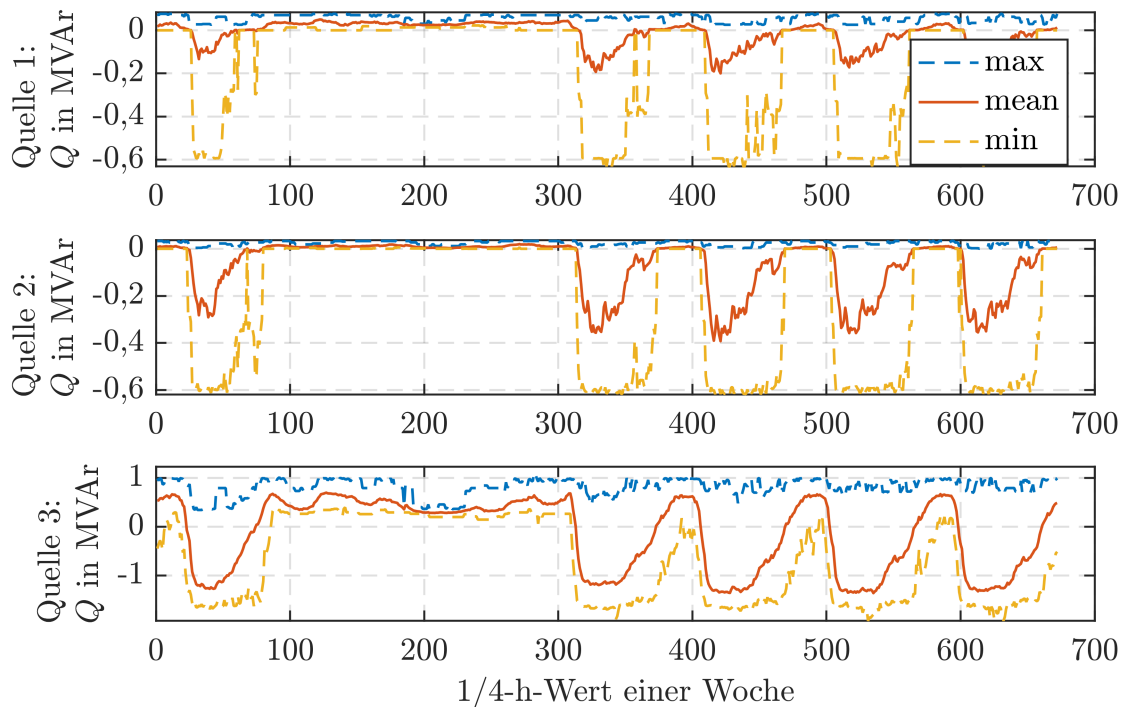


Abbildung 4.22: Extrema und Mittelwerte des Blindleistungsabrufs je Quelle als $\frac{1}{4}$ -h-Wert einer Woche über alle Wochen eines Jahres.

abgerufen, um das kapazitive Verhalten der Netzgruppe bei Schwachlast zu kompensieren. Tagsüber und an Werktagen wird hingegen das kapazitive Potenzial genutzt, um den induktiven Bedarf der Netzgruppe im 1. Quadranten zu reduzieren. Induktives Potenzial wird nahezu ausschließlich von Quelle 3 abgerufen, da dieses dort zeitgleich zum Bedarf vorhanden ist. Die Spannweite der Extrema des Blindleistungsabrufs kann durch den schwankenden Blindleistungsbedarf (z. B. aufgrund saisonaler Effekte im Wirkleistungsverbrauch der Lasten oder den auftreten von Feiertagen) erklärt werden. Die dargestellten Wochenzeitreihen können nicht einfach als „Fahrplan“ für die Blindleistungsquellen verwendet werden und dadurch eine Kommunikationsverbindung mit den Quellen obsolet werden lassen, da z. B. bei Verwendung des Mittelwertes die Einhaltung der Strom- und Spannungsrestriktionen nicht sichergestellt wäre. Theoretisch ließe sich durch Aufteilung des Blindleistungsabrufs auf einen induktiven und kapazitiven Abruf, sowie der Verwendung von Minimalwerten je $\frac{1}{4}$ -h-Wert ein gesicherter Blindleistungsabruf erzielen, der jedoch nur sehr geringe Höhen annehmen würde.

4.4 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Anhand der durchgeführten Simulationen konnte exemplarisch für ein reales MS-Netz gezeigt werden, dass sowohl im Referenzdatensatz (Jahr 2015) als auch in einem unabhängigen Datensatz (Jahr 2016) die Spannungs- und Auslastungsgrenzen bei Abruf von Blindleistung aus Blindleistungsquellen anhand von Vorgaben des entwickelten Steuerungsverfahrens nicht verletzt werden. Den Grenzfall bilden Eingriffsklassen am Rand des Wirk-Blindleistungsverhaltens, die charakteristische Netzauslegungsfälle wie den Starklastfall oder den Starkeinspeisefall beinhalten. Zur Anwendung kam ein Szenario, bei dem das Potenzial der Blindleistungsquellen zu jedem Zeitpunkt den Bedarf übersteigt. Der gewählte Sollwert von 10 MVar führte zu einem induktiven Blindleistungsabruf, der aus Sicht der Arbeitspunktabhängigkeit der Sensitivitätswerte am kritischsten ist. Die im Verfahren enthaltene Worst-Case-Betrachtung zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren und Berechnung der maximal abrufbaren Blindleistung je Eingriffsklasse stellen in den Simulationen die Einhaltung der Auslastungs- und Spannungsgrenzen sicher. Die entstandene Spannweite der Gewichtungsfaktoren und der maximal abrufbaren Blindleistung, die durch die differenzierte Betrachtung von Spannungsebenen und Eingriffsklassen entsteht, zeigt deutlich die Effizienz dieses Ansatzes.

Durch Schwankung der Ränder des Wirk-Blindleistungsverhaltens verschiedener Betrachtungsjahre der Netzgruppe kommt es bei Anwendung des Steuerungsverfahrens zu Arbeitspunkten, für die unter den definierten Randbedingungen kein gesicherter Blindleistungsabruf getätigt werden kann. Dieser Aspekt und mögliche Gegenmaßnahmen werden in Abschnitt 3.5.6 diskutiert.

Im Hinblick auf das Blindleistungspotenzial der Betriebe besitzen diese vor allem kapazitives Potenzial, das den induktiven Netzverhalten senken oder kapazitiven verstärken kann. Das induktive Potenzial der Betriebe beschränkt sich auf Zeitpunkte mittleren bis hohen Leistungsbezugs, weshalb vorrangig induktive Arbeitspunkte der Netzgruppe verstärkt werden könnten.

Der Einfluss auf dem vom Beispielnetz bezogene Blindenergie ist in Abbildung 4.23 abschließend dargestellt. Ausgehend von einer kapazitiven Bilanz in Höhe von ca. -1,6 GVarh, erhöht sich diese im Szenario S1_2 auf ca. 90 GVarh und zeigt

nun induktives Verhalten. Im Szenario S2_1 fällt die Änderung deutlich geringer aus, was am gewählten Sollwert ($Q = 0$ MVar) liegt. Da das Potenzial der betrachteten Blindleistungsquellen vor allem im 1. Quadranten genutzt werden kann, steigt aufgrund fehlender Ausgleichseffekte die kapazitive Blindenergiebilanz auf einen Wert von ca. -3,8 GVarh. Aufgrund der vernachlässigbar kleinen Wirkleistungsänderungen wird auf die Diskussion der Wirkenergiebilanz verzichtet.

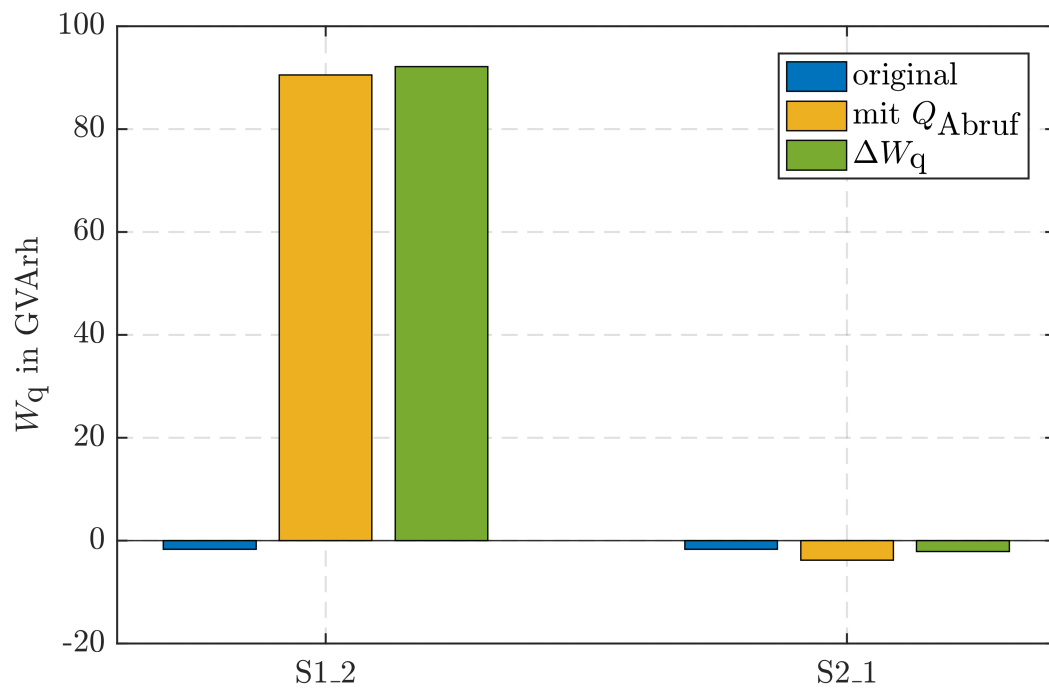


Abbildung 4.23: Vergleich der Blindenergiebilanz des untersuchten MS-Netzes und deren Änderung bei Abruf Blindleistung aus den Blindleistungsquellen der MS-Ebene in den Szenarien S1_2 und S2_1.

Kapitel 5

Schlusswort

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Steuerungsverfahren für Blindleistungsquellen mit Anschlusspunkt in der MS-Ebene entwickelt (Kapitel 3) und mittels Simulationen erprobt (Kapitel 4). Für die Konzeption des Verfahrens werden die technischen und regulatorischen Hintergründe der betrachteten Aufgabenstellung „Einhaltung von Blindleistungsgrenzen zwischen Netzbetreibern“ ausführlich in Kapitel 2 erläutert und diskutiert. Die folgenden Abschnitte fassen die erarbeiteten Erkenntnisse als Resumé zusammen, geben Hinweise für die Anwendung in der Praxis und zeigen Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsarbeiten auf.

5.1 Resumé und Kernaussagen

Die durchgeführten Entwicklungen und exemplarischen Simulationsergebnisse zeigen, dass ein die Blindleistungsbilanz verbessernder Beitrag aus Blindleistungsquellen der MS-Ebene über das entwickelte Steuerungsverfahren grundsätzlich möglich ist, ohne hierfür zusätzliche Messtechnik in der MS-Ebene zu installieren. Als Blindleistungsquellen werden in dieser Arbeit primäre MS-Betriebe mit BKA betrachtet. Durch die technologieneutrale Formulierung des Steuerungsverfahrens lassen sich aber auch andere Blindleistungsquellen (z. B. EZA) analog abbilden. Die resultierende Wirkung auf die Wirk-Blindleistungsbilanz hängt dabei maßgeblich von der

- zeitlichen Korrelation von Blindleistungspotenzial der Blindleistungsquelle und dem Blindleistungsbedarf der Netzgruppe,

- den Auslastungs- und Spannungsfreiräumen der Zweig- und Knotenelemente sowie
- den Anschlusspunkten der Blindleistungsquellen

ab.

Die differenzierte Betrachtung von Spannungsebenen und die Verwendung von Eingriffsklassen zur netzzustandsabhängigen Verteilung des Blindleistungsabrufs ermöglicht eine höhere Ausnutzung des verfügbaren Blindleistungspotenzials und dadurch einen größeren Einfluss auf die Blindleistungsbilanz der Netzgruppe, als diese vergleichsweise bei einer Worst-Case-Betrachtung über alle Arbeitspunkte der Netzgruppe möglich wäre. Pauschale quantitative Aussagen zur Höhe der nutzbaren Blindleistung aus Blindleistungsquellen mit Anschlusspunkt in der MS-Ebene können nicht gemacht werden, da diese, wie eben erläutert, von verschiedenen Einflussfaktoren abhängt und deshalb, wie einleitend in dieser Arbeit diskutiert, eine netzspezifische Bewertung der jeweiligen Netzgruppe verlangt.

Der entwickelte Algorithmus zur Koordination des Blindleistungsabrufs aus mehreren Blindleistungsquellen nutzt die vorgestellten Ansätze der Netz-Sensitivitäts- und -Restriktionsanalyse¹⁸⁵ und bestimmt über Worst-Case-Betrachtungen je Eingriffsklasse Gewichtungsfaktoren und einen maximal zulässigen Blindleistungsabruf zur Aufteilung bzw. Limitierung eines Blindleistungsabrufs. Durch die implementierte Arbeitspunktkorrektur der Sensitivitätswerte wird die Einhaltung von Spannungs- und Auslastungsgrenzen sichergestellt, wie in Kapitel 4 exemplarisch gezeigt werden konnte.

Die Anwendbarkeit des Steuerungsverfahrens wird durch ein „stabiles“ Wirk-Blindleistungsverhalten von Netzgruppen und deren Leistungsflüsse zwischen verschiedenen Jahren begünstigt. Ein solches Verhalten haben vor allem verbrauchergeprägte Netze, wie anhand des betrachteten Beispielnetzes gezeigt werden konnte¹⁸⁶. Anzumerken ist, dass nicht zwangsweise das gesamte Wirk-Blindleistungsverhalten einer Netzgruppe nur geringen Schwankungen unterliegen darf. Letztendlich müssen diese Bedingung nur Arbeitsbereiche (z. B. Wirk-Blindleistungsbereich um den Stark- oder Schwachlastfall) erfüllen, in denen ein Blindleistungsabruf stattfindet.

¹⁸⁵Die Erkenntnisse der Netz-Sensitivitäts- und -Restriktionsanalyse werden zur Formulierung der Randbedingungen des Optimierungsproblems verwendet.

¹⁸⁶Netze mit relevanter Erzeugung durch PV oder Biomasseanlagen sollten ebenfalls gut prognostizierbar sein.

Anhand der Ergebnisse des Steuerungsverfahrens kann unter Berücksichtigung von Spannungs- und Auslastungsrestriktionen bewertet werden, welche Blindleistungsquellen eine signifikante Wirkung auf die Blindleistungsbilanz haben und somit relevant für die Einbindung in ein Blindleistungsmanagement sind. Über die abgeleiteten Gewichtungsfaktoren und maximal zulässigen Blindleistungsabrufe je Eingriffsklassen kann der Blindleistungsabruf aus mehreren Blindleistungsquellen koordiniert werden. Wirk-Blindleistungsarbeitspunkte in bislang noch nicht bewerteten Eingriffsklassen zeigen die Grenzen des Verfahrens auf, da für diese kein gesicherter Blindleistungsabruf pauschal möglich ist. Abhilfemaßnahmen werden in Abschnitt 3.5.6 diskutiert. Bei strukturellen Änderungen in der Netzgruppe (z. B. Zubau von EZA) muss der Prozess, d. h. die Bestimmung der Gewichtungsfaktoren, erneut durchgeführt werden.

Die exemplarisch untersuchten Betriebe zeigen bezogen auf heute vorhandene BKA vor allem ein kapazitives Potenzial, mit dem in Szenario S2_1 die Blindleistungsbilanz des betrachteten MS-Beispielnetzes vor allem im I. Quadranten beeinflusst werden konnte. Induktives Potenzial ist ebenfalls vorhanden und korreliert mit der Wirkleistungsaufnahme des Betriebs. Die Nutzung von Betrieben mit BKA zur Reduzierung des kapazitiven Blindleistungsbedarfs bei Schwachlast ist pauschal nicht als zielführend anzusehen, da hierzu nur Betriebe mit durchgängiger Produktion in Erwägung gezogen werden sollten. Dennoch kann die Nutzung des Blindleistungspotenzials von Betrieben in Kombination mit anderen Blindleistungsquellen und/oder in Abhängigkeit des Blindleistungssollwerts sinnvoll sein.

Abschließend werden die **Kernaussagen** dieser Arbeit formuliert:

- Der gleichzeitige Blindleistungsabruf aus mehreren dezentral verteilten Blindleistungsquellen mit Anschlusspunkt in der MS-Ebene ist über das beschriebene Steuerungsverfahren unter Einhaltung von Spannungs- und Auslastungsgrenzen möglich (siehe Kapitel 3).
- Das enge freie Spannungsband in der MS-Ebene limitiert den Blindleistungsabruf vor den Auslastungsgrenzen der Zweigelemente, verhindert diesen aber nicht zwangsläufig. Entscheidend ist hierbei die differenzierte Betrachtung von entkoppelten Spannungsebenen und Eingriffsklassen.
- Der gewählte Ansatz ist netzplanerisch absicherbar und es können in Abhängigkeit des Blindleistungspotenzials der Blindleistungsquellen merkliche Effekte bei der Beeinflussung der Blindleistungsbilanz erzielt werden (siehe Kapitel 4).

- Die Arbeitspunktabhängigkeit der Spannungs- und Leistungssensitivität betragen nicht zu vernachlässigende Größenordnung und muss deshalb berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 3.2).
- Verstärkungs- und Abschwächungseffekte durch den Blindleistungsbedarf der Netzbetriebsmittel in der MS-Ebene wirken sich, ausgehend von heutigen Verhältnissen mit einer überwiegend geringen Auslastung der Netzbetriebsmittel, vernachlässigbar gering auf den Blindleistungsabruf aus (siehe Abschnitt 2.4.4 und Kapitel 4).
- Kommunikationsverbindungen zu den Blindleistungsquellen zur Übertragung des Sollwertes und Erfassung des eingesetzten Blindleistungspotenzials sind für einen effektiven Einsatz notwendig. Messtechnik zur Überwachung des Blindleistungsabrufs wird durch die planerischen Absicherung obsolet (siehe Abschnitt 3.5.1).
- Das Blindleistungspotenzial von Betrieben stellt sich sehr unterschiedliche dar, weshalb eine genaue Prognose nicht möglich ist. Im Mittel kann über den gesamten Wirkleistungsarbeitsbereich bei heutigen Bestandsanlagen von einem unkompensierten Verhalten in Höhe von ca. 0,62 MVar pro 1 MW Wirkleistungsbezug ausgegangen werden (im Minimum von 0 MVar, siehe Abschnitt 3.4). Bezogen auf einen derzeit üblichen Ziel- $\cos\varphi$ von 0,98, entspricht dies einem Blindleistungspotenzial in Höhe von ca. 0,4 MVar pro 1 MW Wirkleistungsbezug, genauere Aussagen sind lediglich über Einzelmessungen von Betrieben möglich.

5.2 Praxisbezug

Mit dieser Arbeit wird gezeigt, dass ein Blindleistungsabruf aus Blindleistungsquellen der MS-Ebene prinzipiell möglich und vor allem planbar und bewertbar ist. Notwendig sind hierfür idealerweise Zeitreihensimulationen, die bislang noch nicht standardmäßig für MS-Netze in der Praxis eingesetzt werden. Alternativ können auch einzelne auslegungsrelevante Arbeitspunkte (z. B. Stark- oder Schwachlastfall) verwendet werden, denen ein zugehöriger Wirk-Blindleistungsbereich als Eingriffsklasse zugeordnet wird. Aus Sicht des Verfassers dieser Arbeit, ist dieser gewählte Ansatz aber mittelfristig notwendig, um die zukünftigen Aufgaben von Verteilungsnetzbetreibern (u. a. „die Blindleistungsoptimierung“) bewerkstelligen zu können. Das in PowerFactory und MATLAB umgesetzte und weitgehendst automatisierte Verfahren benötigt ca. 6 h für die Berechnung des

Netzmodells und ca. 0,5 h für die Ermittlung der Gewichtungsfaktoren. Die überschaubare Gesamtlaufzeit von ca. 6,5 h¹⁸⁷ erlaubt bei Änderung der Netzstruktur eine schnelle Anpassung der Gewichtungsfaktoren. Grundvoraussetzung ist das Vorhandensein eines geeigneten Netzmodells, das möglichst automatisiert zur Verfügung gestellt und gepflegt werden sollte¹⁸⁸.

Ausgangspunkt der hier vorgestellten Analysen ist der ungestörte Betrieb des Netzes. Dabei ist eine Betrachtung des Ist-Zustandes aber auch von Zukunftsszenarien möglich. Der gestörte Betrieb könnte dahingehend abgesichert werden, dass im Rahmen des Verfahrens auch Ausfälle von Netzbetriebsmitteln berücksichtigt werden, was i. d. R. zu höheren Sensitivitätswerten und niedrigeren maximalen Blindleistungsabrufen führt.

Das Steuerungsverfahren bzw. dessen Ergebnisse können auch in anderer Form in der Praxis genutzt werden. Anhand der ermittelten Gewichtungsfaktoren bzw. Blindleistungsabrufe können im ersten Schritt relevante Blindleistungsquellen (d. h. Quellen mit hohen Blindleistungsabrufen) oder Neubaustandorte für ein Blindleistungsmanagement identifiziert werden. Zudem werden Eingriffsklassen¹⁸⁹ sichtbar, in denen der Blindleistungsabruf durch Netzrestriktionen limitiert wird. Über Netzsimulationen und Anwendung der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Netz-Sensitivitäts- und -Restriktionsanalyse kann geprüft werden, ob Anpassungen der Netzstruktur in Relation zum Gewinn an nutzbarem Blindleistungspotenzial verhältnismäßig sind.

Die Betrachtung der Ergebnisse der Beispielnetzgruppe zeigt, (Abbildung 4.11 und A.36), dass es der Fall sein kann, dass sich die Werte des zulässigen Blindleistungsabrufs in angrenzenden Eingriffsklassen nicht gravierend voneinander unterscheiden. Einzelne Eingriffsklassen könnten somit zu Bereichen mit gleichem Wert zusammengefasst werden, diese resultierenden „Blindleistungsabrufempfehlungen“ für verschiedene Wirk-Blindleistungsarbeitsbereiche einer Netzgruppe könnten als Hilfestellung für die Netzführung dienen, um in Einzelfällen händisch Blindleistung aus Blindleistungsquellen abzurufen.

Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung der Verfahrensergebnisse ist die Erstellung von Blindleistungsabrufzeitreihen. Wie in Abbildung 4.22 angedeutet, könnte ein Blindleistungsfahrplan für die einzelnen Blindleistungsquellen abgeleitet werden.

¹⁸⁷Eingesetzte Hardware: Intel(R) Core(TM) i7-4790 3,4 GHz 32 GB Ram 64-Bitsystem.

¹⁸⁸Ansätze zu diesem Thema wurden im Projekt [7] erarbeitet.

¹⁸⁹Eingriffsklassen, bei denen ein Blindleistungspotenzial der Quellen vorhanden ist, aber kein Abruf stattfindet.

Um die Einhaltung von Netzrestriktionen sicherzustellen, könnten hierbei fiktive Sollwertvorgaben (wie z. B. 10 MVar in Szenario S1_1) genutzt werden, um den minimal zulässigen induktiven/kapazitiven Blindleistungsabruf je $\frac{1}{4}$ -h-Wert einer Woche zu bestimmen. Durch Kombination solcher Szenarien und Auswertung des Blindleistungsbedarfs je $\frac{1}{4}$ -h-Wochenwert könnten so geeignete Fahrpläne in Abhängigkeit der Zeit ($\frac{1}{4}$ -h-Wochenwert) erzeugt werden.

5.3 Anschlussfähigkeit

Seitens des Blindleistungspotenzials der Betriebe bestehen, wie in Abschnitt 3.4 erläutert, noch Unsicherheiten in der Potenzialprognose. Die Ausweitung des betrachteten Datensatzes und die erneute Ableitung einer Prognosekennlinie erscheint aus Sicht des Autors dieser Arbeit nicht als zielführend, da bereits die im Projekt [7] durchgeführten Messungen ein sehr breites Spektrum an Potenzial und Betriebsverhalten aufgezeigt haben. Als sinnvoll erscheint die Entwicklung des „QQM“, der das Potenzial von Betrieben über Messungen erfasst und bereitstellt.

Ein weiterer wichtiger Schritt wäre die Ausdehnung des Steuerungsverfahrens auf mehrere MS-Netze in Verbindung einer Blindleistungsoptimierung in der HS-Ebene. Über das entwickelte Verfahren, könnten die MS-Netze vorgesteuert und das verbleibende Defizit über regelbare Blindleistungsquellen der HS-Ebene ausgeglichen werden. Die Ausdehnung auf mehrere MS-Netze stützt sich auf den Gedanken der Kollektivbildung und den damit verbunden Ausgleichseffekten. Unter Umständen könnte so das zeitlich durchgängig verfügbare induktive/kapazitive Blindleistungspotenzial erhöht werden.

Wie im vorherigen Abschnitt andiskutiert, benötigt das Steuerungsverfahren geeignete Netzmodelle, auf die es angewendet werden kann. Die Erstellung dieser für Netze der MS-Ebene benötigt bis dato noch sehr viel „Handarbeit“ hinsichtlich der Nachbildung des Wirk-Blindleistungsverhaltens der Netzelemente. Um zukünftig standardmäßig komplexere Aufgabenstellungen für Verteilungsnetze zu bewerten, braucht es geeignete Verfahren, über die die benötigten Netzmodelle automatisiert oder teilautomatisiert erstellt werden können.

Kapitel A

Anhang

A.1 Blindleistungsverhalten von Transformatoren und Leitungen

„Transformatoren nehmen induktive Blindleistung auf. Diese unterteilt sich in eine nahezu konstante Hauptfeld-Blindleistung und eine belastungsabhängige Streufeld-Blindleistung. Das in Abbildung 2.4 im Abschnitt 2.3.2 dargestellte Blindleistungsverhalten zeigt eine quadratische Abhängigkeit zur Auslastung. Der Blindleistungsbedarf von Leitungen, wie z. B. in Abbildung 2.5 im Abschnitt 2.3.2 dargestellt, lässt sich in guter Näherung in einen konstanten kapazitiven Anteil Q_C und einen auslastungsabhängigen induktiven Teil Q_L aufteilen. Q_C ist durch die Netzspannung und den Suszeptanzbelag B'_L bestimmt, wohingegen Q_L durch den Reaktanzbelag X'_L und den Leitungsstrom beeinflusst wird. Konstruktive Einflussfaktoren auf die beiden Leitungsbeläge sind der Leiterabstand und der verwendete Isolierstoff. Deshalb besitzen Kabel einen höheren Suszeptanzbelag als Freileitungen, die ihrerseits einen höheren Reaktanzbelag als Kabel aufweisen. Der kapazitive und induktive Blindleistungsbedarf kompensieren sich teilweise. Lediglich die Differenz bildet sich als gesamter Blindleistungsbedarf ab. Bereits ab geringem Verkabelungsgrad verhält sich das Netz in Schwachlastzeiten kapazitiv, in Starklastzeiten induktiv. Ausgeglichen in seiner Blindleistungsbilanz ist eine Leitung, wenn sich die kapazitive und induktive Blindleistung gegenseitig aufheben. Dies ist der Fall, wenn sie ihre natürliche Leistung P_{nat} überträgt. Im NS-Netz verhalten sich Kabel als auch Freileitungen schon bei niedriger Leitungsauslastung induktiv. Im MS-Netz muss stärker zwischen den Leitungstypen differenziert werden, da sich Freileitungen überwiegend induktiv

verhalten ($P_{\text{nat}} \ll S_{\text{therm}}$), Kabel jedoch nahezu über den kompletten Auslastungsbereich kapazitiv wirken ($P_{\text{nat}} \approx S_{\text{therm}}$). Erfolgt ein Netzausbau vorwiegend mit Kabeln, bewirkt dies ein zunehmendes kapazitives Verhalten des Verteilungsnetzes. Das NS-Netz selbst bleibt induktiv (ausgenommen Leerlauf), das MS-Netz wird mit zunehmendem Verkabelungsgrad kapazitiver. Soll das Netz weniger stark kapazitiv wirken, müsste im MS-Netz vor allem auf einen höheren Freileitungsanteil gesetzt oder eine höhere Auslastung der bestehenden Leitungen angestrebt werden. Durch einige Umformungen der Blindleistungssumme ergibt sich folgender auslastungsabhängige und auf die Leitungslänge normierte Ausdruck: $Q' = [(b \cdot \frac{S_{\text{therm}}}{P_{\text{nat}}})^2 - 1] \cdot Q'_C$. Dabei beschreibt S_{therm} die thermische Grenzleistung der Leitung ($S_{\text{therm}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{Dauer}} \cdot U_n$), b den Belastungsgrad bzw. die Auslastung der Leitung, die das Verhältnis von übertragener Scheinleistung zur thermischer Scheinleistung wiedergibt ($b = \frac{S_{\text{ü}}}{S_{\text{therm}}}$) und P_{nat} die natürliche Leistung der Leitung ($P_{\text{nat}} = \frac{U_n^2}{X_L \cdot X_C}$). Beim Betrieb der Leitung mit P_{nat} erfolgt eine reine Wirkleistungsübertragung. Die Blindleistungsbilanz der Leitung ist null. D. h. der induktive Blindleistungsbedarf Q_L der Leitung entspricht der bereitgestellten kapazitiven Blindleistung Q_C . Bei unternatürlichem Betrieb ($b < \frac{P_{\text{nat}}}{S_{\text{therm}}}$) überwiegt der kapazitive Anteil der Leitung, wohingegen bei übernatürlichem Betrieb ($b > \frac{P_{\text{nat}}}{S_{\text{therm}}}$) die Leitung induktiv wirkt.“ [3]

A.2 Eckdaten der verwendeten Beispiel-Mittelspannungsnetze

Im Folgenden werden die markantesten Eckdaten der in dieser Arbeit verwendeten vier Beispielnetze tabellarisch beschrieben. Hierbei werden zunächst die eindeutig einer Netzebenen zuordenbaren Parameter dargestellt, Tabelle A.1 bis A.3, bevor in Tabelle A.5 und Tabelle A.4 netzebenenübergreifende Werte dokumentiert werden. Die Wirk-Blindleistungsdigramme der Beispielnetze Land_EZA, Land_Betrieb und Stadt_Industrie werden in Abschnitt 2.3.2 in Abbildung 2.6 bis 2.8 dargestellt. Ergänzt zeigt Abbildung A.1 das Beispielnetz Stadt_Zentrum.

Tabelle A.1: Eckdaten der Netzebene 4

Parameter	Land_ EZA	Land_ Betrieb	Stadt_ Zentrum	Stadt_ Industrie
S_r in MVA	40	40	40	40
Stufenspannung in % und Stufenanzahl	1,7 / 27	1,7 / 27	1,7 / 19	1,7 / 19
Spannungssollwert in kV	20,5	20,5	21,2	21,2

Tabelle A.2: Eckdaten der Netzebene 5

Parameter	Land_ EZA	Land_ Betrieb	Stadt_ Zentrum	Stadt_ Industrie
Anzahl MS- Abgänge	5	7	9	7
MS-Leitungslänge in km	239	81	43	90
Verkabelungsgrad in %	19	31	1	0,81
Ladeleistung in MVA _r	-2	-1	-3	-3

Tabelle A.3: Eckdaten der Netzebene 6

Parameter	Land_ EZA	Land_ Betrieb	Stadt_ Zentrum	Stadt_ Industrie
Anzahl MS/NS- Stationen	185	60	51	105

Tabelle A.4: Installierte EZA-Leistung

Parameter	Land_ EZA	Land_ Betrieb	Stadt_ Zentrum	Stadt_ Industrie
Photovoltaik in MW	31	10	1	6
Windenergie in MW	8	1	0	0
Biomasse in MW	7	2	0	1

Tabelle A.5: Sonstige Eckdaten

Parameter	Land_ EZA	Land_ Betrieb	Stadt_ Zentrum	Stadt_ Industrie
Maximale Wirkleistungsaufnahme der Lasten in MW	9	2	19	23
Extrema der Wirkleistungsbi-lanz in MW	-30 / 6	-10 / 10	7 / 19	3 / 21
Extrema der Blindleistungsbi-lanz in MVar	-2 / 6	-1 / 4	-1 / 3	-3 / 4

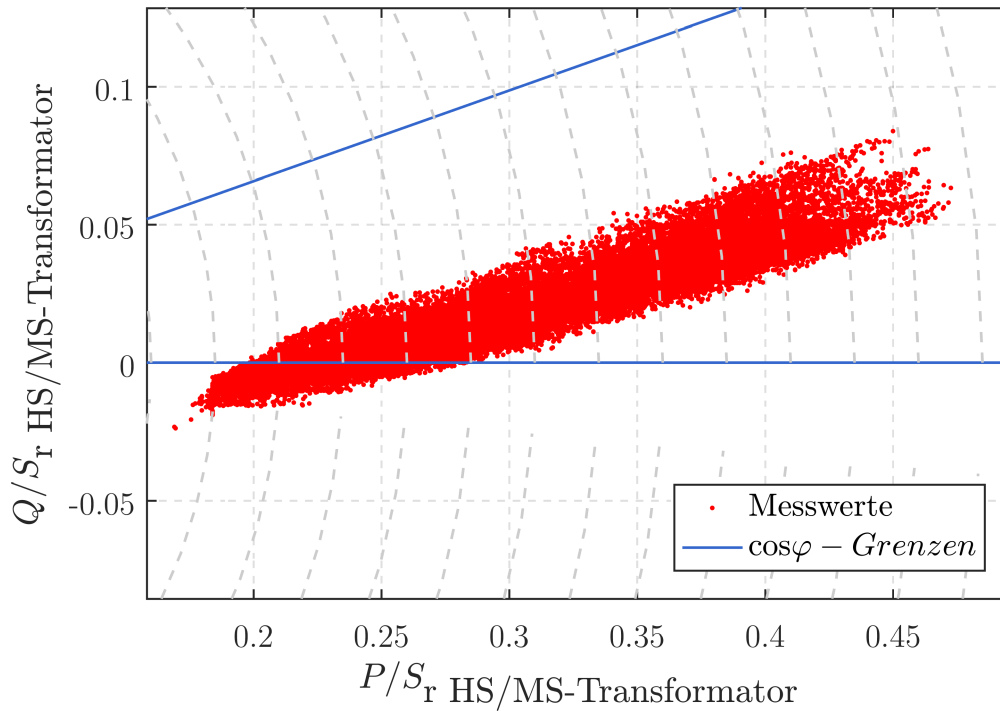


Abbildung A.1: Wirk-Blindleistungsverhalten eines MS-Netzes (Beispielnetz Stadt_Zentrum) mit dominanten MS-Betrieben. Wirk- und Blindleistung sind auf die Bemessungsleistung des HS/MS-Transformators $S_{r \text{ HS/MS-Transformator}}$ normiert, die 40 MVA beträgt. Datenbasis bilden Messwerte eines Netzbetreibers aus dem Projekt [2] in Form von 15-Minuten-Mittelwerten für den Zeitraum eines Jahres.

A.3 Erläuterung des Netzplanungsprozesses

Die Netzplanung bei Netzbetreibern lässt sich in zwei Bereiche unterteilen, die in Abbildung A.2 visualisiert sind.

Den ersten bildet die Grundsatzplanung, über die eine Netzstrategie abgeleitet wird. Grundlage hierfür sind szenarienbasierte (Veränderung der Last-/Einspeise- und Netzstruktur) Analysen unter Berücksichtigung wesentlicher Einflussfaktoren (z. B. Ziele der Energiewende oder Anreizregulierung). Zwischenergebnis der Grundsatzplanung ist ein Zielnetz für einzelne Netzteile, welche die konkrete strukturelle Ausprägung beschreibt. Das Zielnetz wird dabei in Abhängigkeit der Einhaltung von definierten Randbedingungen (z. B. Spannungshaltung, Betriebsmittelbelastung, Netzverluste, Verfügbarkeit, Kosten und sonstigen Anforderungen aus dem aktuellem Regulierungsrahmen) bestimmt. Im Einklang mit

der Erneuerungsstrategie (Zustandsbeurteilung und Instandsetzungsplanung der Netzbetriebsmittel) des Netzbetreibers wird letztendlich die Netzstrategie abgeleitet. Die Netzstrategie beinhaltet u. a. netzbetreiberinterne Standards (z. B. Standardquerschnitte für Leitungen mit definierten Transportaufgaben, wie z. B. der Versorgung von öffentlichen NS-Netzbereichen, um die Lagerhaltungskosten gering zu halten.), Richtlinien (wie z. B. die in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen netzbetreiberspezifischen Ergänzungen der TAB) und umzusetzende Maßnahmen, hinsichtlich der Netzentwicklung in Richtung Zielnetzstruktur innerhalb eines definierten Betrachtungszeitraums.

Der zweite Bereich ist die Detailplanungen mit einer nun maßnahmenbezogenen Planungsperspektive, in der die Vorgaben der Grundsatzplanung umgesetzt werden. Die Konkretisierung der erforderlichen Netzanpassungsmaßnahmen erfolgt unter Berücksichtigung maßnahmenspezifischer Einflussfaktoren (z. B. Erschließungs-/ Straßenbauplanung, Ausgestaltungsspielräume in Normen und TAB, wie z. B. die Wahl der Führungsgröße für einen Blindleistungsabruf aus EZA), die nicht standardisiert in der Netzstrategie abgebildet werden können. Im Rahmen dieses Schrittes wird auch ein Variantenvergleich (z. B. Freileitungsneubeseilung vs. Teilverkabelung) durchgeführt, dessen Ergebnisse über die Bewertung der Wirtschaftlichkeit Eingang in die Grundsatzplanung finden. Grundsatzplanung und Detailplanung sind somit nicht unabhängig von einander, sondern beeinflussen sich gegenseitig. Finales Ergebnis der Detailplanung sind die konkreten Umsetzungsvorgaben für jede einzelne Maßnahme.

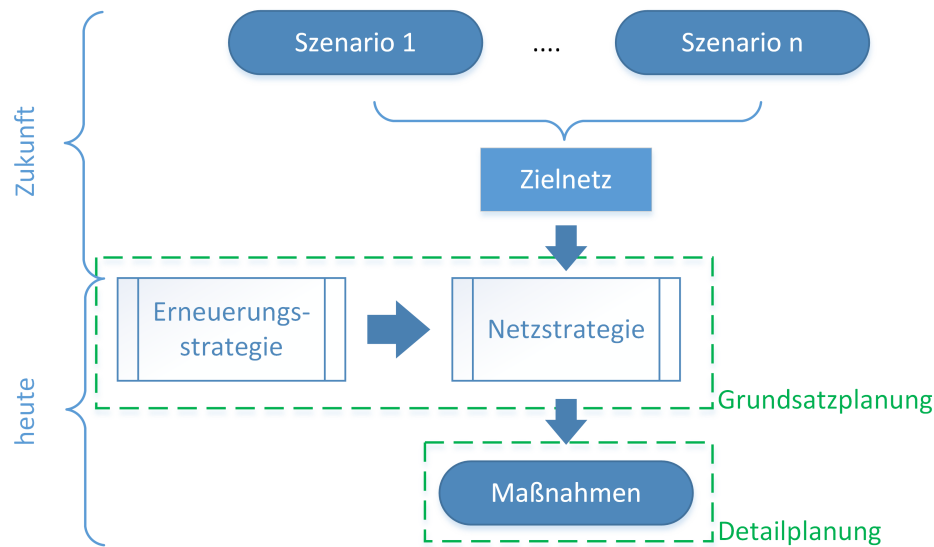


Abbildung A.2: Schematische Darstellung des Netzplanungsprozesses bei Netzbetreibern.

A.4 Blindleistungsverhalten in der MS- und MS/HS-Ebene

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Verfahren zur Blindleistungsbereitstellung durch Blindleistungsquellen mit Anschlusspunkt in der MS-Ebene diskutiert. Wie in Abschnitt 2.4.3, 2.4.4 und 3.2 gezeigt wird, ist der Einfluss auf die Spannungshaltung und Betriebsmittelauslastung u. a. abhängig vom Ausgangsarbeitspunkt. Im Folgenden werden die vier in Anhang A.2 beschriebenen realen MS-Netze hinsichtlich ihres heutigen Wirk-Blindleistungsverhalten näher untersucht. Als Zielgröße wird dabei der $\tan\varphi$ an 20 Messpunkten ausgewertet (je Netz an der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators und an vier weiteren Messpunkten in der MS-Ebene). Datenbasis bilden 15-Minuten-Mittelwerte von Wirk- und Blindleistung (Summenleistung über alle drei Phasen), die über das Netzleitsystem des jeweiligen Netzbetreibers ermittelt werden. In den Netzgruppen Stadt_Zentrum und Stadt_Industrie werden ergänzende Simulationsdaten¹⁹⁰ für die Messpunkte der MS-Ebene herangezogen, da für diese beiden Netze keine realen Messdaten vorliegen.

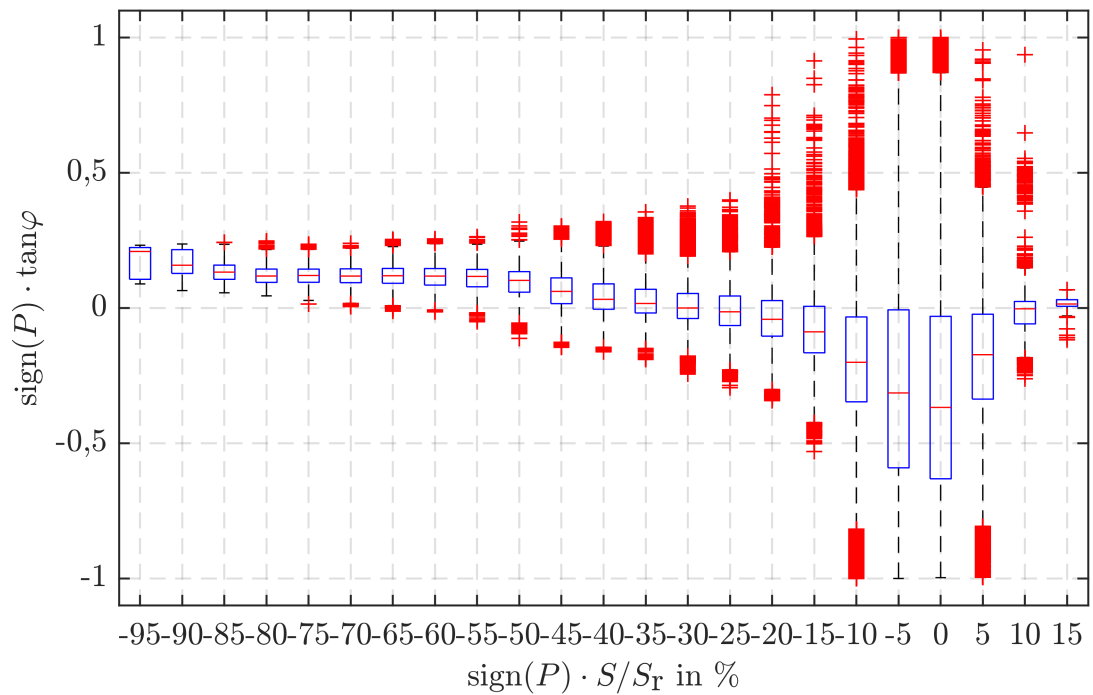
Abbildung A.3 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Auswertung des $\tan\varphi$ -Verhaltens in MS-Netzen und am HS/MS-Transformator, die in ihrem Verhalten

¹⁹⁰Basis zur Ermittlung der Simulationsergebnisse bildet ein Netzmodell, das u. a. Messwerte von Lasten und Einspeisern mit einer Auflösung von 15-Minuten-Mittelwerten verwendet.

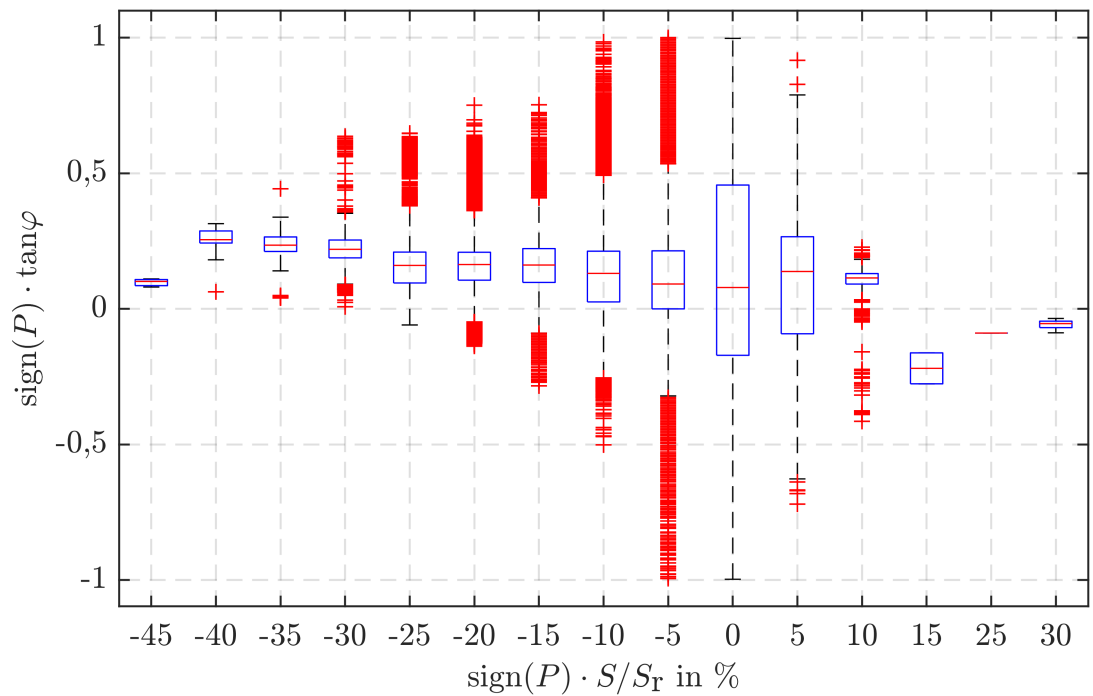
auch als stellvertretend für die verbleibenden Messpunkte angesehen werden können. Typisch hierfür ist, dass mit zunehmender Scheinleistung¹⁹¹ die Wirkleistung dominiert und der $\tan\varphi$ gegen einen Wert von ca. $\pm 0,2$ (Median) strebt und gleichzeitig dessen Streuung deutlich abnimmt. Dies gilt sowohl für die komplette Netzgruppenbilanz (gemessen an der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators), als auch für einzelne Leitungsabschnitte in allen vier betrachteten MS-Netzen. Der $\tan\varphi$ wird in den Diagrammen multipliziert mit dem Vorzeichen der Wirkleistung dargestellt, dadurch kennzeichnet ein positiver Wert induktives und ein negativer kapazitives Verhalten der Netzgruppe¹⁹².

¹⁹¹Um zwischen Bezugs- und Rückspeisezeitpunkten differenzieren zu können, wird die Scheinleistung mit dem Vorzeichen der Wirkleistung multipliziert.

¹⁹²Bei den Leitungsabschnitten ist zu beachten, dass die Einteilung in induktives/kapazitives Verhalten bzw. in Wirkleistungsbezug/-rückspeisung nicht ohne weiteres möglich ist, da dies von der Bezugsrichtung der Messung abhängig ist.



(a) HS/MS-Transformator



(b) Mittelspannungleitung

Abbildung A.3: $\tan \varphi$ -Verhalten für verschiedene Auslastungsbereiche des HS/MS-Transformators und einer ausgewählten MS-Leitung von Beispielnetz Land_EZA.

Das Blindleistungsverhalten der Netze bei betragsmäßig niedrigen Wirkleistungswerten wird von der kapazitiven Ladeleistung dominiert, was durch die Lage der „Boxen“ in Abbildung A.3 bestätigt wird. Die Streuung der $\tan\varphi$ -Werte entsteht durch die Überlagerung von Lasten und EZA. Teil- und Starklastarbeitspunkte der Netzgruppe werden durch die Wirkleistungseinspeisung von EZA im Wirk-Blindleistungsdigramm in Richtung des II. und III. Quadranten im Wirk-Blindleistungsdigramm verschoben. Hierbei entstehen Arbeitspunkte mit nahezu ausgeglichener Wirkleistungsbilanz aber verbleibendem Blindleistungsbedarf, die zu hohen $\tan\varphi$ -Werten führen. In den Wirkleistungsextrema Starklastfall und Starkrückspeisung dominiert die Wirkleistung und entsprechend gering fallen die $\tan\varphi$ -Werte aus.

Die Korrelation zwischen der Auslastung des HS/MS-Transformators und der Auslastung der MS-Leitung stellt sich sehr unterschiedlich dar. Der Korrelationskoeffizient weist in den 16 betrachteten Datensätzen Werte zwischen 0,06 und 0,97 auf. Hohe Werte werden vor allem in den städtisch geprägten Netzen generiert, da hier das dominante Lastverhalten eine homogen Leitungsauslastung in der MS- und HS/MS-Ebene verursacht. Ausnahmen bilden einzelne Messpunkt (z. B. Stich mit Industriebetrieb) die ein individuelles Kundenverhalten mit widerspiegeln. In Abbildung A.4 wird dies durch zwei augenscheinlich getrennte Punktwolken ersichtlich, die die Verhältnisse am Wochenende (untere „Wolke“) und an Werktagen (obere „Wolke“) beschreiben. In den ländlichen EZA-geprägten Netzen wird ein Wert von 0,5 nicht überschritten, was auf die inhomogene Verteilung der EZA und damit inhomogenen Leitungsauslastung, sowie die bereits beschriebenen Ausgleichseffekte in Bezug auf die Wirkleistungsbilanz zurück zu führen ist.

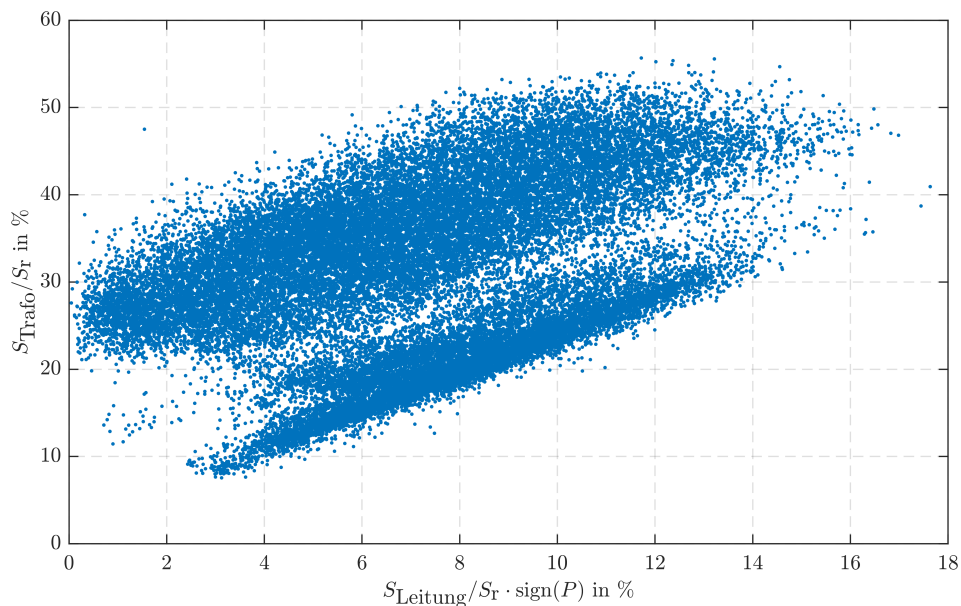


Abbildung A.4: Zusammenhang der Auslastung des HS/MS-Transformators von Beispielnetz Stadt_Industrie und der zeitgleichen Auslastung einer exemplarischen MS-Leitung.

A.5 Grundlagen der Netz-Sensitivitätsanalyse

Mit Verweis auf [70] sollen im Nachfolgenden die Grundlagen der Sensitivitätsanalyse aufgezeigt werden. Basis der Spannungssensitivitätsanalyse ist das bei der Lastflussberechnung zu lösende Gleichungssystem Formel A.1, welches mittels des Knotenpotenzialverfahrens formuliert werden kann. \mathbf{Y} ist dabei die Admittanzmatrix, \vec{U} ein Vektor mit den komplexen Spannungen jedes Knotens i und \vec{I} ein Vektor mit den komplexen Strömen jedes Knotens.

$$\vec{I} = \mathbf{Y} \cdot \vec{U} \quad (\text{A.1})$$

Durch Verwendung des Zusammenhangs $S_i = \underline{U}_i \cdot \underline{I}_i^*$ bzw. $\underline{I}_i = \frac{S_i^*}{\underline{U}_i^*}$ erhält man ein System, bei dem die i. d. R. bekannten Wirk- und Blindleistungswerte jedes Knotens direkt einzusetzen sind¹⁹³, die auch Basis dieser Zusammenfassung sind.

¹⁹³Im Rahmen dieser Herleitung wird nur auf PQ-Knoten und einen Slack-Knoten $n = 1$ eingegangen, PV-Knoten bei denen Wirkleistung und Spannung bekannt sind analog integrierbar. Eine Ausführliche Herleitung enthält [70].

Getrennt nach $Re\{\underline{S}_i\}$ und $Im\{\underline{S}_i\}$ können daraus folgende Gleichungen für jeden Knoten i abgeleitet werden, die vom Potenzialen \underline{U}_j aller Knoten $j = 1...n$ abhängen:

$$\underline{u}_i = U_i \cdot (\cos\Theta_i + j \cdot \sin\Theta_i) \quad (\text{A.2})$$

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j \cdot (G_{ij} \cdot \cos\Theta_{ij} + B_{ij} \cdot \sin\Theta_{ij}) \quad (\text{A.3})$$

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j \cdot (G_{ij} \cdot \sin\Theta_{ij} - B_{ij} \cdot \cos\Theta_{ij}) \quad (\text{A.4})$$

Θ_{ij} ist dabei die Differenz der Spannungswinkel zwischen Knoten i und j . Die hier in Polarkoordinaten dargestellt Spannung kann analog durch kartesische Koordinaten formuliert werden.

Die unbekannte Größe in diesem System ist nach wie vor die komplexe Spannung \underline{u}_i an jedem Knoten. Der Fehler durch Verwendung einer „geschätzten“ Spannung zu den eigentlichen Knotensollwerten $P_{i \text{ Soll}}$ und $Q_{i \text{ Soll}}$ kann durch Gleichung A.5 und A.6 ausgedrückt werden.

$$\Delta P_i = P_{i \text{ Soll}} - P_i = P_{i \text{ Soll}} - U_i \sum_{j=1}^n U_j \cdot (G_{ij} \cdot \cos\Theta_{ij} + B_{ij} \cdot \sin\Theta_{ij}) \quad (\text{A.5})$$

$$\Delta Q_i = Q_{i \text{ Soll}} - Q_i = Q_{i \text{ Soll}} - U_i \sum_{j=1}^n U_j \cdot (G_{ij} \cdot \sin\Theta_{ij} - B_{ij} \cdot \cos\Theta_{ij}) \quad (\text{A.6})$$

Zur Lösung dieses nichtlinearen Gleichungssystems wird das Newton-Raphson-Verfahren angewendet, das iterativ die Lösung bestimmt. Basis hierbei ist die Linearisierung der Problemstellung durch einer nach dem zweiten Glied abgebrochenen Taylorreihe. Dieses zweite Glied verkörpert die Linearisierung im Entwicklungspunkt und führt letztendlich zur Jakobi-Matrix \mathbf{J} , welche die partiellen Ableitungen von ΔP_i und ΔQ_i nach U_j und Θ_j enthält. Für die Berechnung ist mindestens ein Slack-Knoten mit definierter Spannung notwendig. In dieser Herleitung befindet sich dieser am Knoten mit dem Index $n = 1$. Infolge dessen reduziert sich das zu lösende Gleichungssystem auf $2 \cdot (n - 1)$ Gleichungen. Formel A.7 zeigt das resultierende Gleichungssystem.

$$\begin{pmatrix} P_2 \text{ Soll} - P_2 \\ \dots \\ P_n \text{ Soll} - P_n \\ Q_2 \text{ Soll} - Q_2 \\ \dots \\ Q_n \text{ Soll} - Q_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta P_2 \\ \dots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \dots \\ \Delta Q_n \end{pmatrix} = -\mathbf{J} \cdot \begin{pmatrix} \Delta \Theta_2 \\ \dots \\ \Delta \Theta_n \\ \frac{\Delta U_2}{U_r} \\ \dots \\ \frac{\Delta U_n}{U_r} \end{pmatrix} \quad (\text{A.7})$$

mit

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{K} & \mathbf{L} \end{pmatrix} \quad (\text{A.8a})$$

$$H_{ij} = \frac{\delta \Delta P_i}{\delta \Theta_j} \quad (\text{A.8b})$$

$$N_{ij} = U_j \cdot \frac{\delta \Delta P_i}{\delta U_j} \quad (\text{A.8c})$$

$$K_{ij} = \frac{\delta \Delta Q_i}{\delta \Theta_j} \quad (\text{A.8d})$$

$$L_{ij} = U_j \cdot \frac{\delta \Delta Q_i}{\delta U_j} \quad (\text{A.8e})$$

Der Vorfaktor U_j in den Formeln entstehen durch die Verwendung von Leistungswerten anstelle von Stromwerten und bleiben bei Ableitungen nach dem Spannungsbetrag erhalten. Die Nebendiagonalelemente von \mathbf{J} mit $i \neq j$ besitzen folgende Form:

$$H_{ij} = U_i \cdot U_j \cdot (G_{ij} \cdot \sin \Theta_{ij} - B_{ij} \cdot \cos \Theta_{ij}) \quad (\text{A.9a})$$

$$N_{ij} = -U_i \cdot U_j \cdot (G_{ij} \cdot \cos \Theta_{ij} + B_{ij} \cdot \sin \Theta_{ij}) \quad (\text{A.9b})$$

$$K_{ij} = U_i \cdot U_j \cdot (G_{ij} \cdot \sin \Theta_{ij} + B_{ij} \cdot \cos \Theta_{ij}) \quad (\text{A.9c})$$

$$L_{ij} = -U_i \cdot U_j \cdot (G_{ij} \cdot \cos \Theta_{ij} - B_{ij} \cdot \sin \Theta_{ij}) \quad (\text{A.9d})$$

Die Hauptdiagonalelemente der Untermatrizen mit $i = j$ ergeben sich nach Anwendung der Produktregel und den Einsatz von Additionstheoremen (durch die die Ausdrücke Q_i und P_i wieder entstehen) wie folgt:

$$H_{ii} = U_i^2 \cdot B_{ii} + Q_i \quad (\text{A.10a})$$

$$N_{ii} = -U_i^2 \cdot G_{ii} - P_i \quad (\text{A.10b})$$

$$K_{ii} = U_i^2 \cdot G_{ii} - P_i \quad (\text{A.10c})$$

$$L_{ii} = U_i^2 \cdot B_{ii} - Q_i \quad (\text{A.10d})$$

Zur Iterativen Lösung der System sind folgende Schritte notwendig:

1. Festlegung von P_i Soll und Q_i Soll
2. Aufstellen der Admittanzmatrix
3. Startwerte der Knotenspannung \underline{u}_i setzen
4. Bestimmung der Fehler nach Gleichung A.5 und A.6
5. Prüfung ob Fehler akzeptabel: wenn ja, dann hier Abbruch
6. Berechnung von \mathbf{J} , Formeln A.8b bis A.8e
7. Ermittlung des Spannungswertes der nächsten Iteration
8. weiter mit Schritt 4

Schritt 7 soll an dieser Stelle weiter ausgeführt werden, da über ihn die gesuchten Netz-Sensitivitäten ermittelt werden können. Gleichung A.7 kann wie folgt nach der gesuchten Spannungsänderung je Knoten $\Delta \underline{u}_i$ aufgelöst werden:

$$-\mathbf{J}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \Delta P_1 \\ \dots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \dots \\ \Delta Q_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta \Theta_1 \\ \dots \\ \Delta \Theta_n \\ \frac{\Delta U_1}{U_1} \\ \dots \\ \frac{\Delta U_n}{U_n} \end{pmatrix} \quad (\text{A.11})$$

Die inverse Jakobi-Matrix enthält dabei die Empfindlichkeit der komplexen Knotenspannung \underline{u}_i des jeweiligen Knoten ($i = 1 \dots n$) hinsichtlich einer Wirk- bzw. Blindleistungsänderung. Die Hauptdiagonalelemente beschreiben dabei die Spannungssensitivität eines Knotens bei Wirk- bzw. Blindleistungsänderung an ihm.

Die Nebendiagonalelemente die Spannungssensitivität eines Knotens hinsichtlich einer Wirk- bzw. Blindleistungsänderung an einem anderen Knoten des Netzes.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Spannungssensitivität eines beliebigen Knotens i verwendet, um die Auswirkung eines Blindleistungsabrufs vom Knoten q zu bewerten und im Rahmen der Restriktionsanalyse den maximal zulässigen Blindleistungsabruf zu bestimmen.

Neben der Spannungssensitivität der Knoten-Elemente wird die Leistungssensitivität, d. h. die Wirk- und Blindleistungsänderung des Leistungsflusses über einen Zweig, der Zweigelemente für die Restriktionsanalyse benötigt. Ermittelt werden diese über die proportionale Änderung des Wirk- und Blindstroms. Der komplexe Strom \underline{I}_{ij} über ein Zweigelement, dass die Knoten i und j verbindet, errechnet sich nach Formel A.12.

$$\underline{I}_{ij} = \underline{Y}_{ij} \cdot (\underline{U}_i - \underline{U}_j) \quad (\text{A.12})$$

Bei konstanter Admittanz \underline{Y}_{ij} ist folglich die Abhängigkeit des Zweigstroms $\Delta \underline{I}_{ij}$ von einer am Knoten k stattfindenden Stromänderung, durch die Änderung der Spannung am Knoten i und j beschreiben, siehe Formel A.13.

$$\Delta \underline{I}_{ij} = \underline{Y}_{ij} \cdot [\Delta \underline{U}_i(\Delta \underline{I}_k) - \Delta \underline{U}_j(\Delta \underline{I}_k)] \quad (\text{A.13})$$

Durch Verwendung der berechneten Knotenspannungen können die Abhängigkeiten $\Delta \underline{U}_i(\Delta \underline{I}_q)$ und $\Delta \underline{U}_j(\Delta \underline{I}_q)$ durch Elemente der inversen Jakobi-Matrix ersetzt und die Zweigstromänderung in Abhängigkeit der Leistungsänderung an einem Knoten ausgedrückt werden, siehe Formel A.14. Analog kann der Einfluss einer Wirkleistungsänderung beschrieben werden, was z. B. in [71] verwendet wird.

$$\Delta \underline{I}_{ij}(\Delta Q_q) = \underline{Y}_{ij} \cdot \left(\frac{\delta \underline{U}_{iq}}{\delta Q} - \frac{\delta \underline{U}_{jq}}{\delta Q} \right) \cdot \Delta Q_q \quad (\text{A.14})$$

A.6 Arbeitspunktabhängigkeit der Spannungssensitivität der Knotenelemente in der MS-Ebene

Tabelle A.6 und A.7 zeigt die Parameter der in Abschnitt 3.2.1 untersuchten Leitungen. Das verwendete Modell ist in Abschnitt 3.2.1.2 beschrieben. Da eine Punkt-„Last“ und die Spannung am Ende der Leitung im Untersuchungsfokus stehen, wird vereinfacht mit konzentrierten Leitungsparametern (ein π -Ersatzschaltbild über gesamte Leitungslänge) gerechnet.

Tabelle A.6: Parameter der verwendeten Leitungen

Leitung	X in Ω	R in Ω	S_r in MVA
NA2XSJ 3x150	0,10	0,21	11
Einebenenmast mit 94-AL1/15-ST1A	0,37	0,31	12
Donaumast mit 2 Systemen Al/St 435/55	0,13	0,02	685

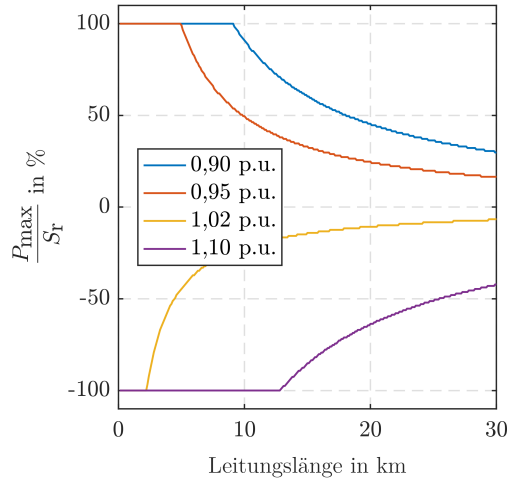
Tabelle A.7: Parameter des verwendeten Transformators

Parameter	Wert
S_r in MVA	40
relative Kurzschlussspannung in %	15,72
X/R -Verhältnis	43
Nennübersetzungsverhältnis	110/20-kV
Leerlaufstrom in %	0,035
Eisenverluste in kW	12,9
Stufenspannung in % und Stufenanzahl	1,25 / 19

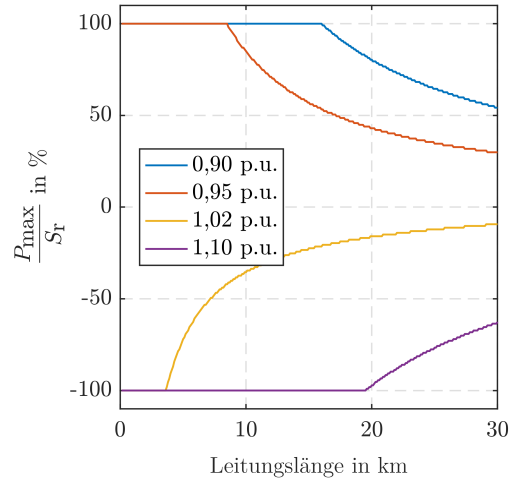
Der Einfluss der Spannungsbandgrenzen auf die maximal übertragbare Leistung der beiden betrachteten MS-Leitungen ist in Abbildung A.5 illustriert. Abbildung A.5 (a) und (b) zeigen die maximal anschließbare Wirkleistung bei $\cos\varphi = 1,00$ in Abhängigkeit der Leitungslänge und bei verschiedenen Spannungsgrenzwerten. In Analogie zur Wirkleistungsbetrachtung stellt Abbildung A.5 (c) und (d) die Ergebnisse der maximal anschließbaren Blindleistung dar. Deutlich zu er-

kennen ist, dass die übertragbare Leistung mit zunehmender Länge durch die Spannungsgrenzen eingeschränkt wird. Bei kompletter Spannungsbandausnutzung, was z. B. durch einen flächendeckenden Einsatz von RONT ermöglicht wird (siehe [41]), liegen die Werte, die zuvor durch die Spannung limitiert wurden, deutlich höher als bei den heute typischen Spannungsgrenzwerten. Bei 20 km Leitungslänge und typischen Spannungsgrenzen beträgt die Anschlusswirkleistung maximal ca. -10 % bis 25 % der Nennscheinleistung bei der Freileitung und -16 % bis 43 % beim Kabel. Die analogen Werte für die Blindleistung betragen ca. -9 % bis 21 % der Nennscheinleistung bei der Freileitung und -35 % bis 81 % beim Kabel.

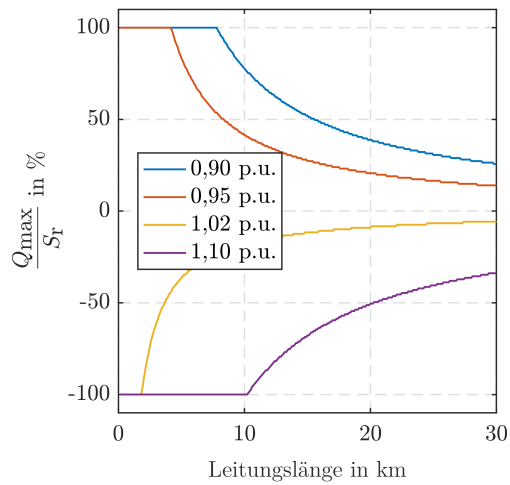
Im Folgenden werden zu Abschnitt 3.2.1.3 ergänzte Grafiken dargestellt, die dort sinngemäß erläutert werden.



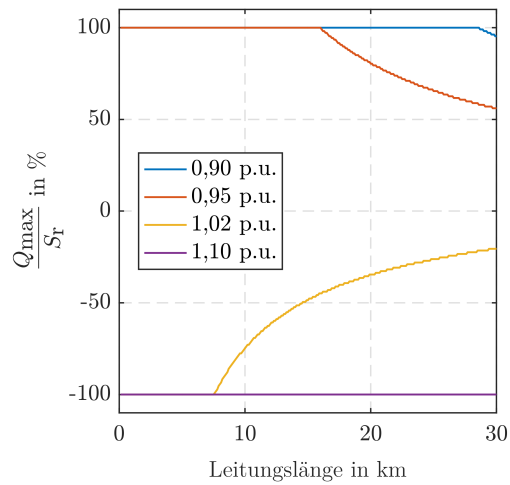
(a) max. Wirkleistung Freileitung



(b) max. Wirkleistung Kabel



(c) max. Blindleistung Freileitung



(d) max. Blindleistung Kabel

Abbildung A.5: Maximales Wirkleistungs- bzw. Blindleistungsverhalten am Leitungsende bei $\cos\varphi = 1,00$ bzw. $P = 0$ in Abhängigkeit der Leitungslänge und bei verschiedenen Spannungsgrenzwerten ($U_c = \pm 10\%$ bzw. $U_c = +2\% / -5\%$).

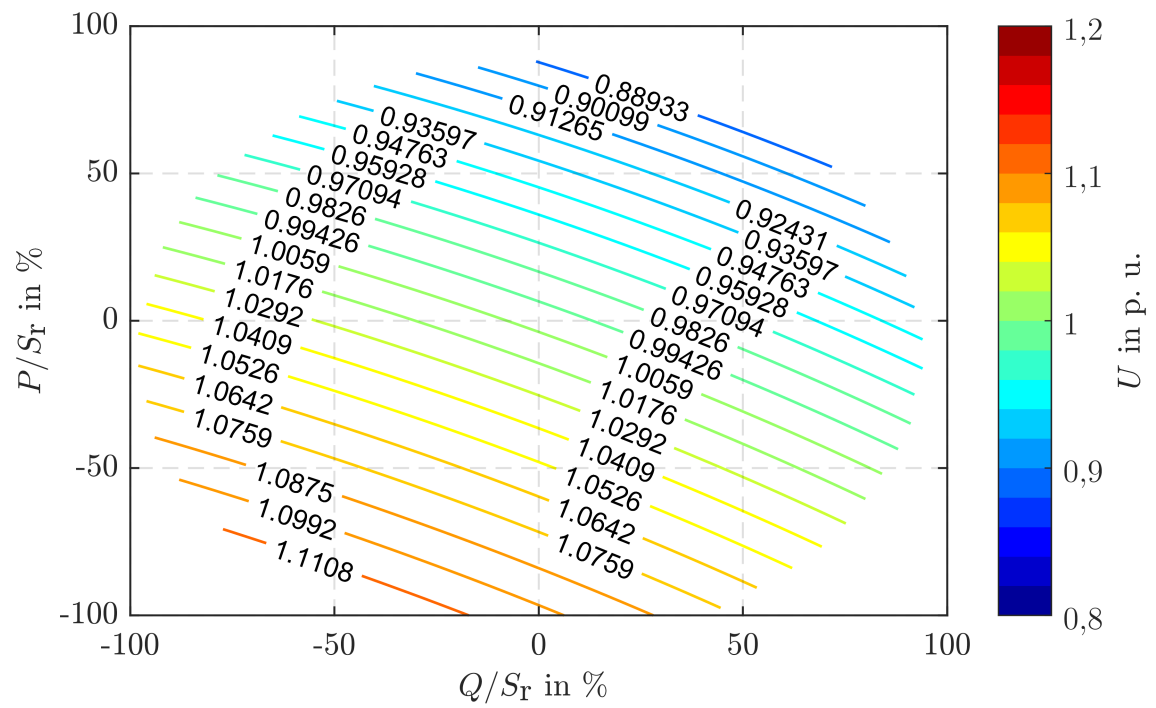


Abbildung A.6: Äquipotenziallinien des Spannungsniveaus am Ende des Kabels mit 20 km Leitungslänge bei verschiedenen Arbeitspunkten.

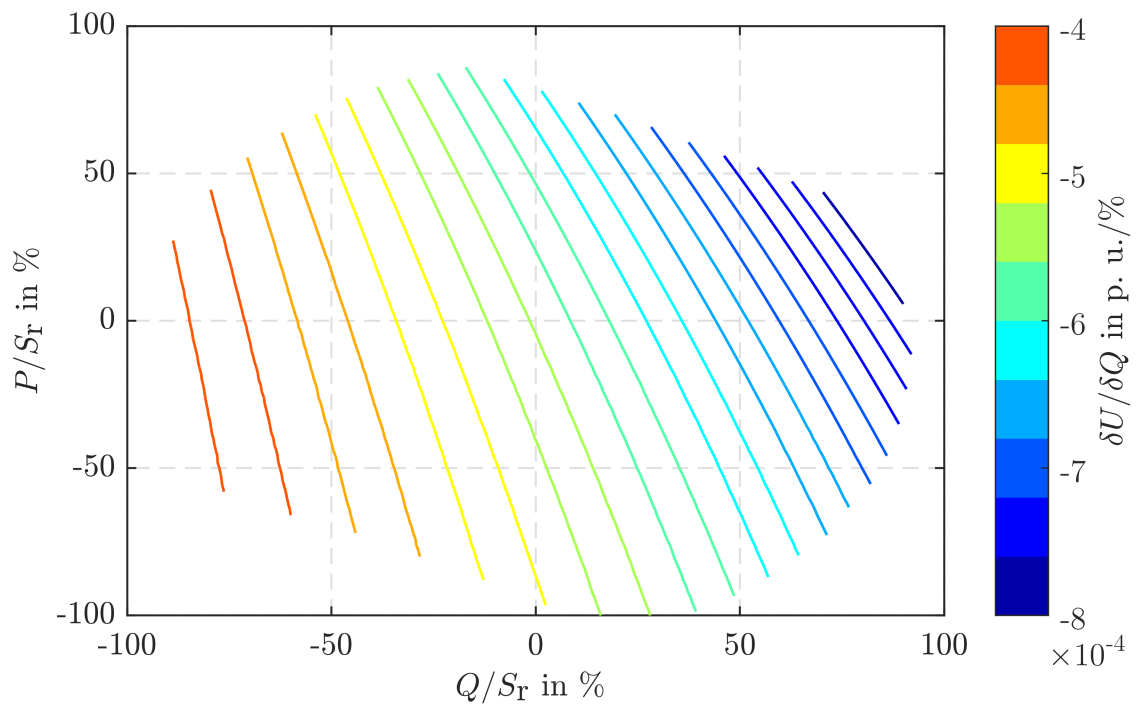


Abbildung A.7: Spannungssensitivität des Kabels in Abhängigkeit des Blindleistungsarbeitspunktes bei Arbeitspunkten innerhalb der Grenzen $U_c \pm 10$ % sowie einer Leitungsauslastungen ≤ 100 %.

Abbildung A.8 zeigt den maximalen Fehler in % bezogen auf den auftretenden Maximalwert der Spannungssensitivität (= betragsmäßiger Minimalwert am linken Rand des zulässigen Arbeitsbereichs) bei konstantem P (Klassenbreite beträgt 2 % von S_r). Aufgrund des deutlich größeren zulässigen Arbeitsbereichs beim Kabel (siehe Abbildung A.11 im Anhang A.6) bzw. bei Verwendung der Spannungsgrenzen $U_c \pm 10$ % sind die Fehler in diesen Szenarien am größten. An den Rändern des P -Arbeitsbereichs nimmt der Fehler, ab da die Breite des zulässigen Arbeitsbereichs bei konstantem P -Niveau abnimmt. Der maximale Fehler mit dem der Wert der Spannungssensitivität unterschätzt wird liegt bei der Freileitung bei ca. 20 % bzw. 75 % und beim Kabel bei ca. 60 % bzw. 95 %. Die Einschränkung auf einen typischen Blindleistungsarbeitsbereiche (Strichpunktlinien) führt vor allem beim Kabel bei Szenarien mit Spannungsgrenzen von $U_c \pm 10$ % zu einer deutlichen Fehlerreduzierung.

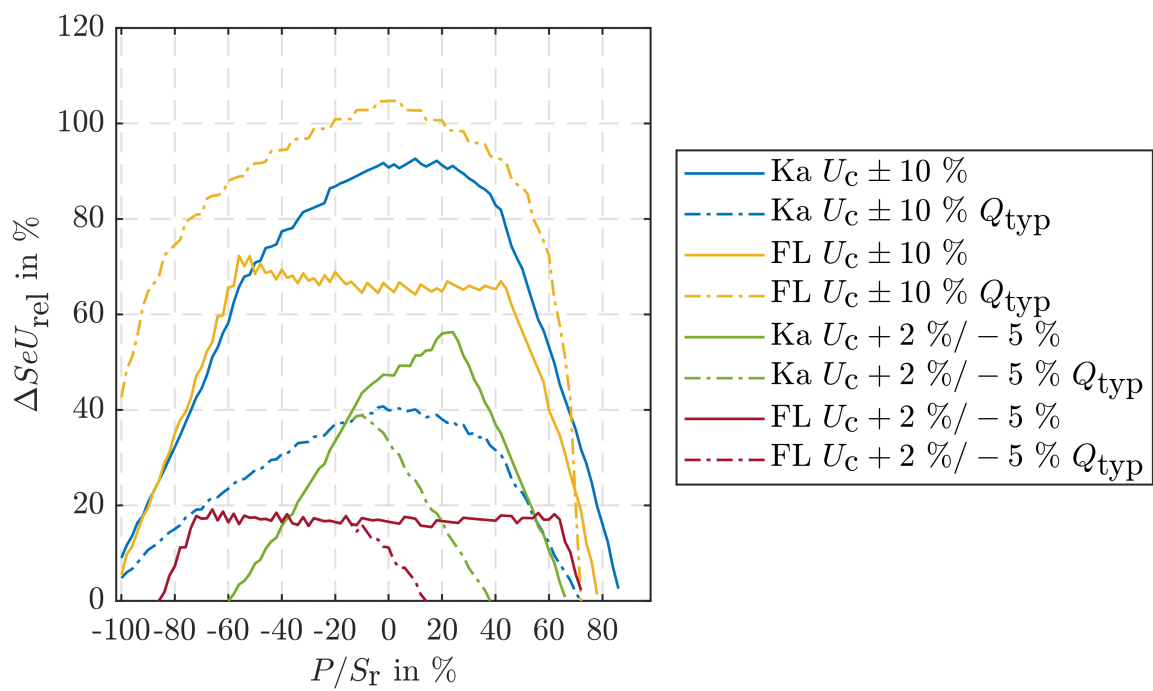


Abbildung A.8: Maximal mögliche Änderung der Spannungssensitivität in % der minimalen Sensitivität bei konstantem P in der MS-Ebene für verschiedene Leitungstypen, Spannungsgrenzen und Blindleistungsarbeitsbereiche.

A.7 Arbeitspunktabhängigkeit der Spannungssensitivität am HS/MS-Transformator

Im Folgenden werden zu Abschnitt 3.2.1.4 ergänzte Grafiken dargestellt, die dort sinngemäß erläutert werden.

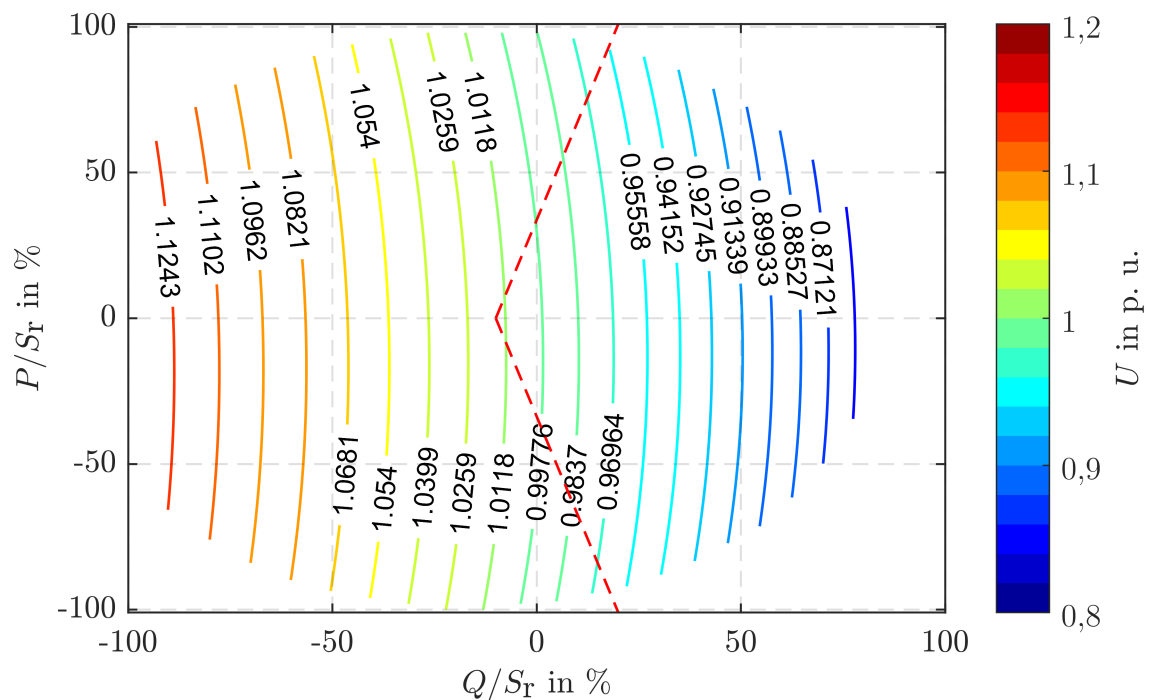


Abbildung A.9: Äquipotenziallinien des Spannungsniveaus an der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators bei verschiedenen Arbeitspunkten innerhalb der Grenzen $U_c \pm 10\%$ sowie einer Auslastung kleiner oder gleich 100 %.

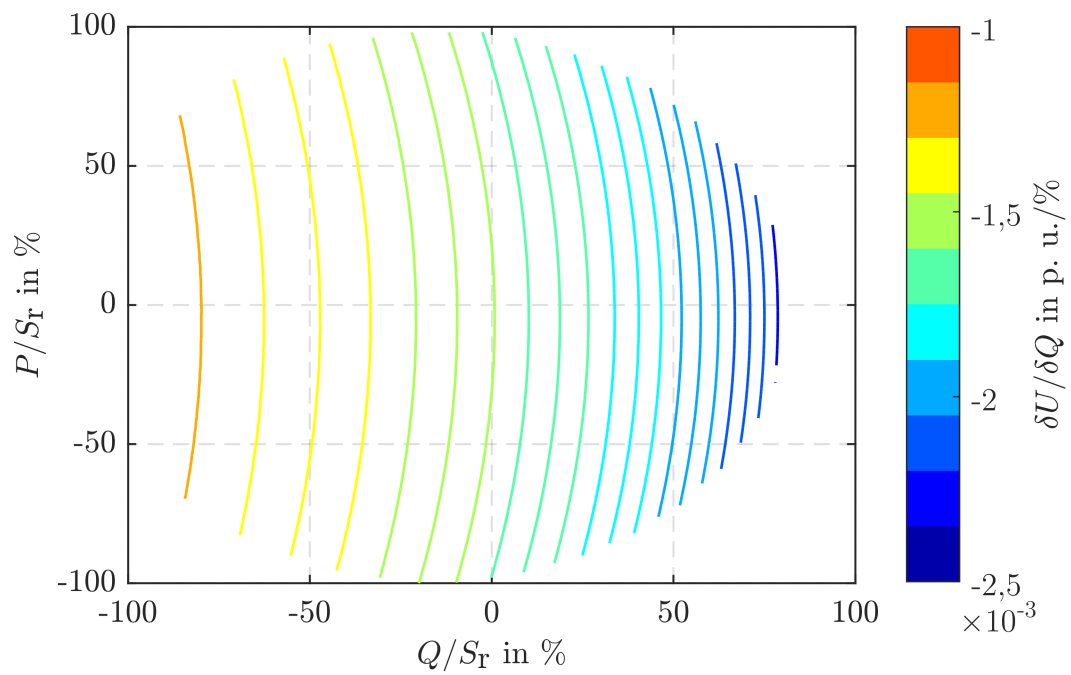


Abbildung A.10: Äquipotenziallinien der Spannungssensitivität an der Unterspannungsseite des HS/MS-Transformators bei verschiedenen Arbeitspunkten innerhalb der Grenzen $U_c \pm 10$ % sowie einer Auslastung kleiner oder gleich 100 %.

A.8 Arbeitspunktabhängigkeit der Spannungssensitivität der HS-Ebene

Im Folgenden werden zu Abschnitt 3.2.1.5 ergänzte Grafiken dargestellt, die dort sinngemäß erläutert werden.

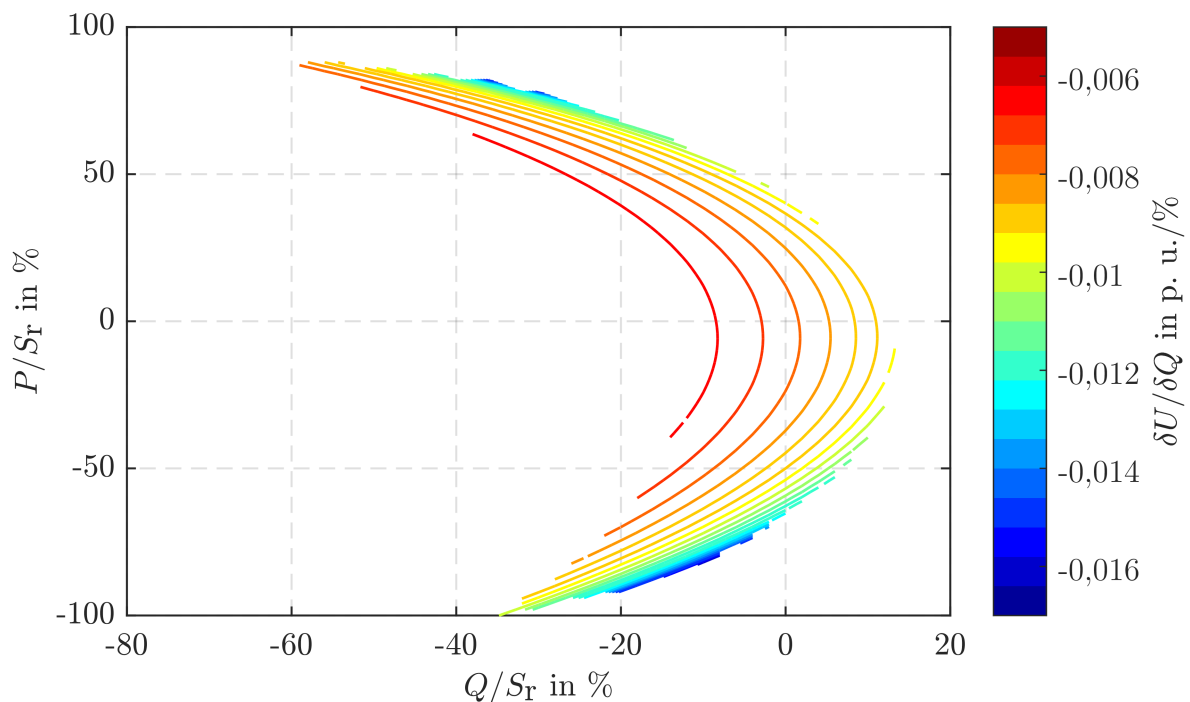


Abbildung A.11: Spannungssensitivität einer HS-Leitung mit 100 km Länge bei Arbeitspunkten innerhalb der Grenzen 96 kV bis 123 kV sowie bei maximalen Leitungsauslastungen ≤ 100 %.

A.9 Arbeitspunktabhängigkeit der Leistungssensitivität der Zweigelemente

Im Folgenden werden zu Abschnitt 3.2.1.6 ergänzte Grafiken dargestellt, die dort sinngemäß erläutert werden.

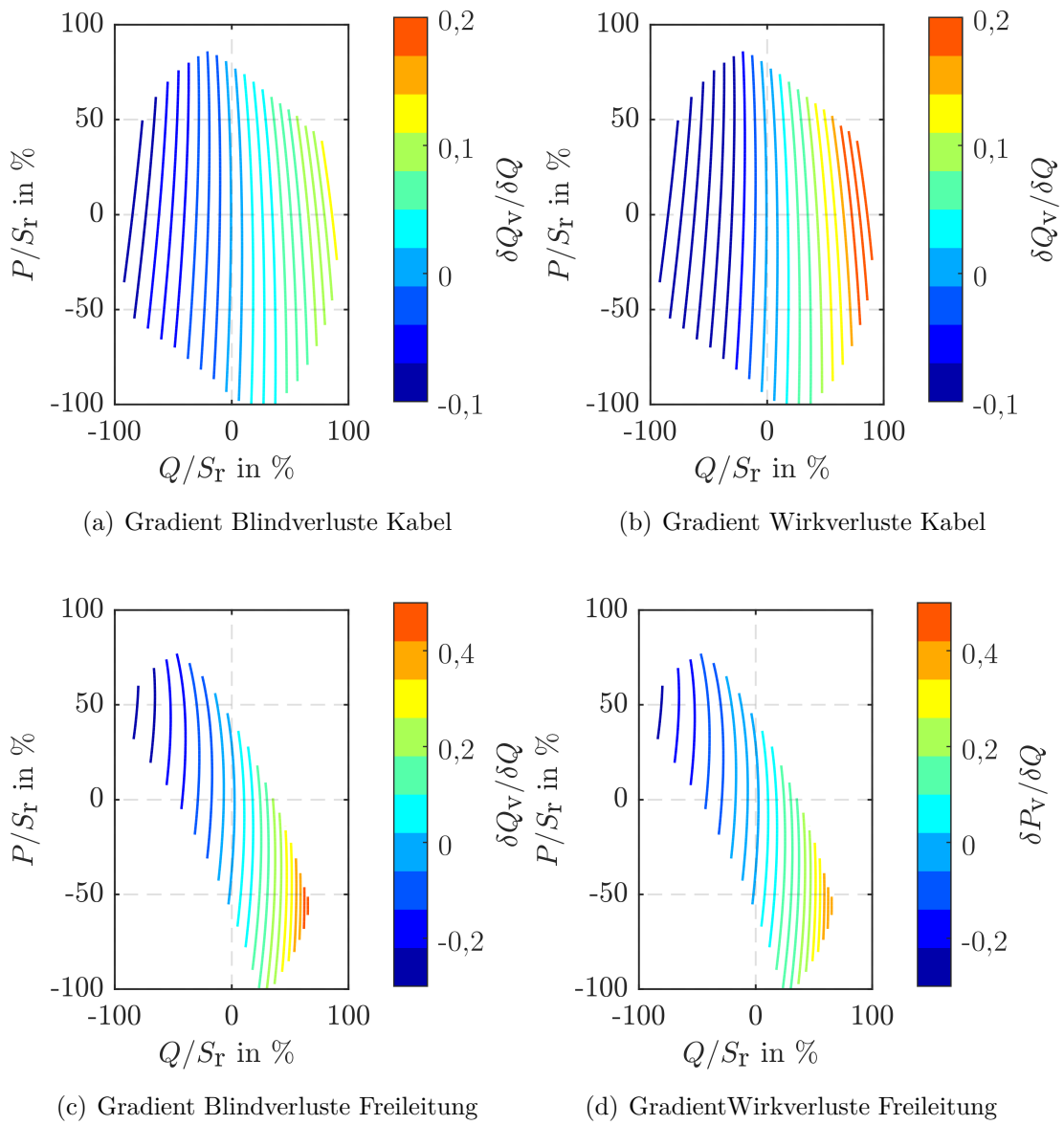


Abbildung A.12: Äquipotenziallinien des Gradienten der Verluständerung von Kabel und Freileitung bei einer Leitungslänge von 20 km in Abhängigkeit des Arbeitspunktes.

A.10 Datenbasis für Prognosemodell zur Bestimmung des Blindleistungspotenzials von Betrieben

Die Datengrundlagen der in Abschnitt 3.4 durchgeführten Untersuchung bildet ein Messdatensatz von 20 Einzelmessungen¹⁹⁴, der von der Firma KBR Kompensationsanlagenbau GmbH zur Verfügung gestellt wurden. Im Vorfeld bereits selektiert wurden Messdaten mit einem Wirkleistungsmaximum größer oder gleich 200 kW, da im Fokus der Untersuchungen größere Betriebe stehen. Die Messdaten (Wirk-, Blindleistung und $\cos\varphi$ je Phase) stehen als 10-Minuten-Mittelwerte für den Zeitraum von ca. einer bis maximal 2 Wochen je Messpunkt zur Verfügung. Die Messdaten wurden im Zuge der Auslegung von BKA mit dem Netzanalysator PQ Box 100 erhoben. Vor Verwendung der Messdaten wurden Datensätze mit Einspeiser, vorhandener (aber nicht ausreichender) BKA ausselektiert, sodass letztendlich 13 Datensätze verwendet werden konnten. Die gemessenen Betriebe zeigen ein breites Branchenspektrum (Hotel, Molkerei, Papierherstellung, Krankenhaus, Bank, Maschinenbau, usw.).

A.11 Modellbewertung anhand von Ergebnissen des Projektes SyNErgie

In [2] wurden fünf MS-Betriebe mit insgesamt 32 BKA vermessen¹⁹⁵. Abbildung A.13 stellt das Verhältnis zwischen ermittelten maximalen induktiven Potenzial zum maximalen Wirkleistungsbezug dar. Die große Schwankung der Werte zeigt, wie unterschiedlich sich das Potenzial in der Realität darstellt.

¹⁹⁴Der Umfang der Datenbasis erhebt nicht den Anspruch, die Grundgesamtheit des unkompenzierten Verhaltens verschiedenster Betriebe zu beschreiben. Er ist vielmehr als Stichprobe zu verstehen, über die das Prognoseverfahren hergeleitet wird. Für die Anwendung in der Praxis wäre es notwendig, die Datenbasis sukzessive auszubauen.

¹⁹⁵Die Messdaten stehen in Form von 1-Minuten-Mittelwerten für die Dauer von 2 bis 3 Wochen je Betrieb zur Verfügung.

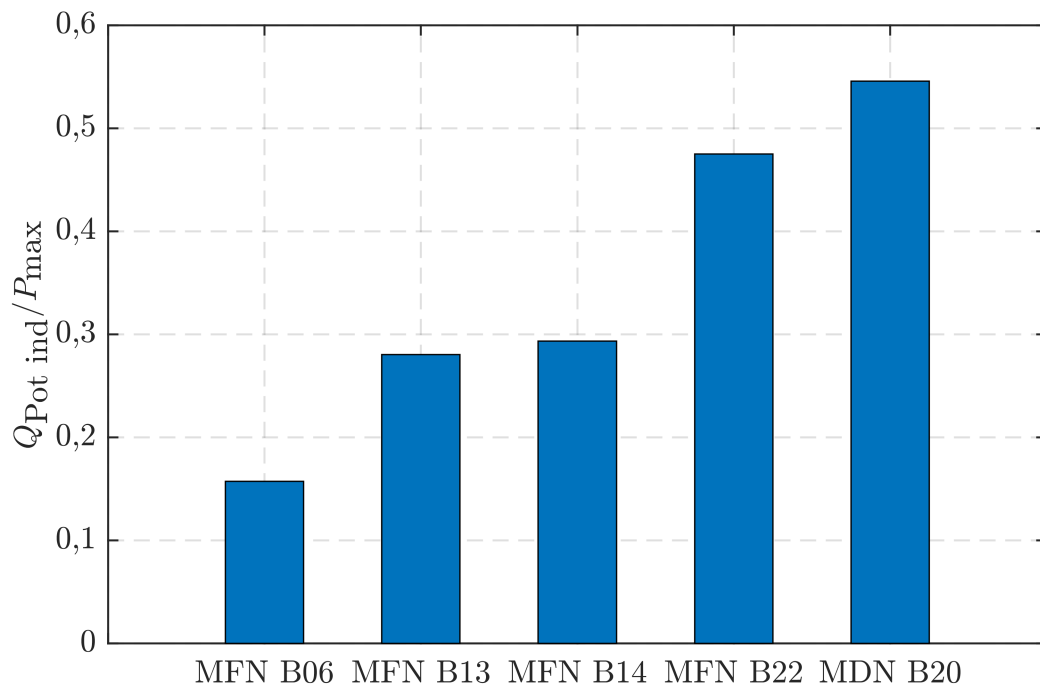


Abbildung A.13: Verhältnis des maximal gemessenen induktiven Blindleistungspotenzials zur maximalen Wirkleistungsaufnahme verschiedener MS-Betreibe. Nach [7].

Abbildung A.14 zeigt das Verhältnis von installierter Kompensationsleistung zur maximalen Wirkleistungsaufnahme verschiedener in [2] analysierter MS-Betriebe. Auffällig ist, dass bei einigen Betrieben der Wert über 100 % liegt. Dies liegt u. a. an „überschüssigen“¹⁹⁶ Kompensationskapazitäten. Wie anhand von Gesprächen mit Vertretern der Betriebe erörtert werden konnte, liegt diese an gesunkenen Blindleistungsverbräuchen aufgrund von Modernisierungen von Anlagen, Verlagerung von Produktionsstätten und/oder geplanten, aber noch nicht genutzten Produktionsflächen¹⁹⁷.

¹⁹⁶Bei den in [7] vermessenen Betrieben wurde i. d. R. eine maximale Ausnutzung von 60 % (maximal genutzte BKA-Leistung bezogen auf die Summe der installierte Kompensationsleistung) nicht überschritten.

¹⁹⁷Die Infrastruktur von Produktionsstätten bei Neubauten, d. h. auch die Elektroinstallation, wird langfristig und damit meist großzügig ausgelegt.

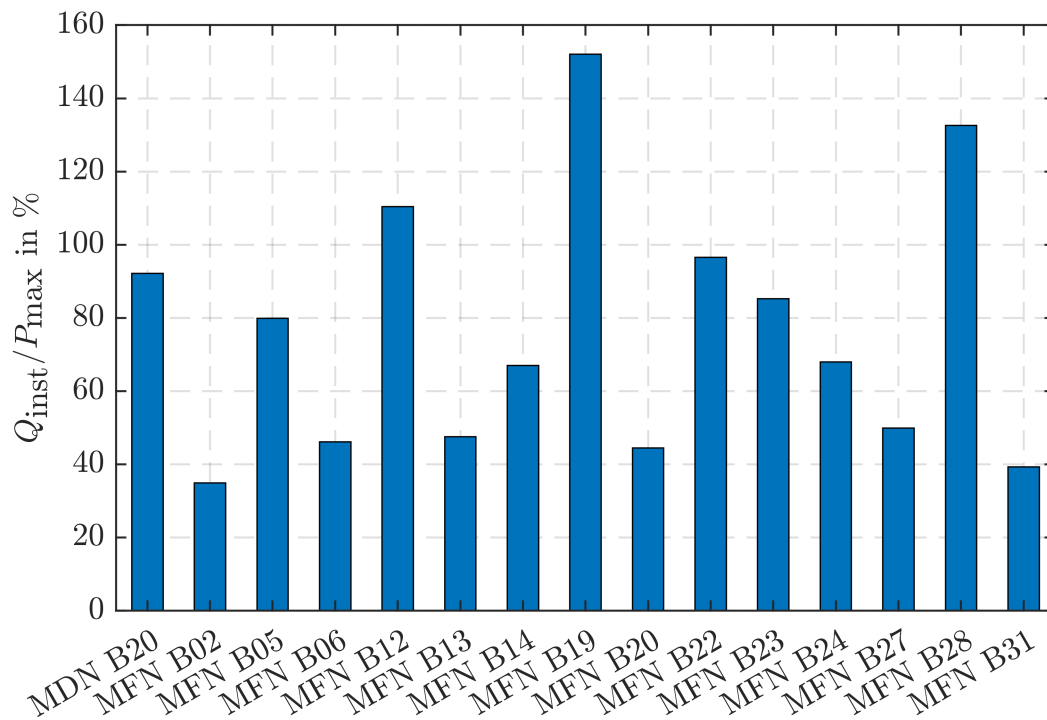


Abbildung A.14: Verhältnis der installierten BKA-Leitung zur maximalen Wirkleistungsaufnahme verschiedener MS-Betreibe. Nach [7].

Die erstellte Prognosefunktion wird auf die Datensätze der fünf in [2] gemessenen MS-Betreibe angewendet. Die Verhältnisse von gemessenen und prognostizierten¹⁹⁸ maximalen bzw. minimalen induktiven Blindleistungspotenzial zeigt Abbildung A.15. Wie schon in Abschnitt 3.4.3 anhand der Evaluierung der Prognosefunktion aufgezeigt wird, kann es sowohl zu einer Über- als auch zu einer Unterschätzung des Potenzial kommen. Die Werte zum minimalen Potenzial können nur bei Betrieben mit durchgängigen induktiven Blindleistungspotenzial dargestellt werden, da sonst das Verhältnis zu null wird.

¹⁹⁸Die Prognose wird auf 15-Minutenmittelwerte eines Jahres angewendet.

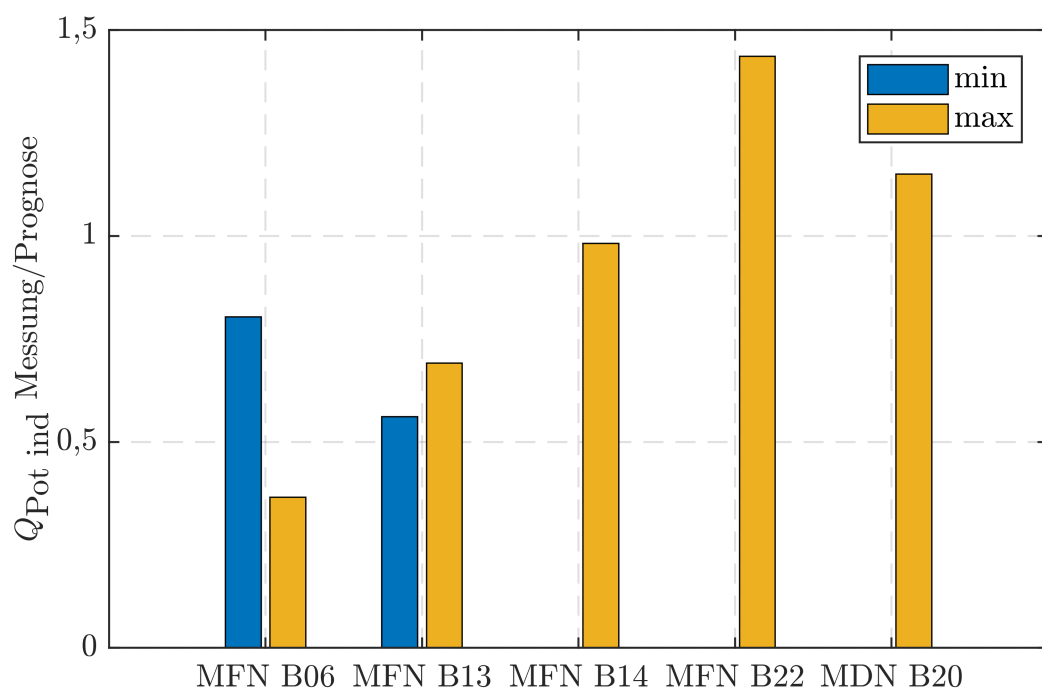


Abbildung A.15: Verhältnis von minimal bzw. maximal gemessenen zu minimal bzw. maximal prognostizierten induktivem Blindleistungspotenzial. Nach [7].

A.12 Evaluierung des Prognosemodells zur Bestimmung des Blindleistungspotenzials von Betrieben

Im Folgenden werden zu Abschnitt 3.4.3 ergänzte Grafiken dargestellt, die dort sinngemäß erläutert werden.

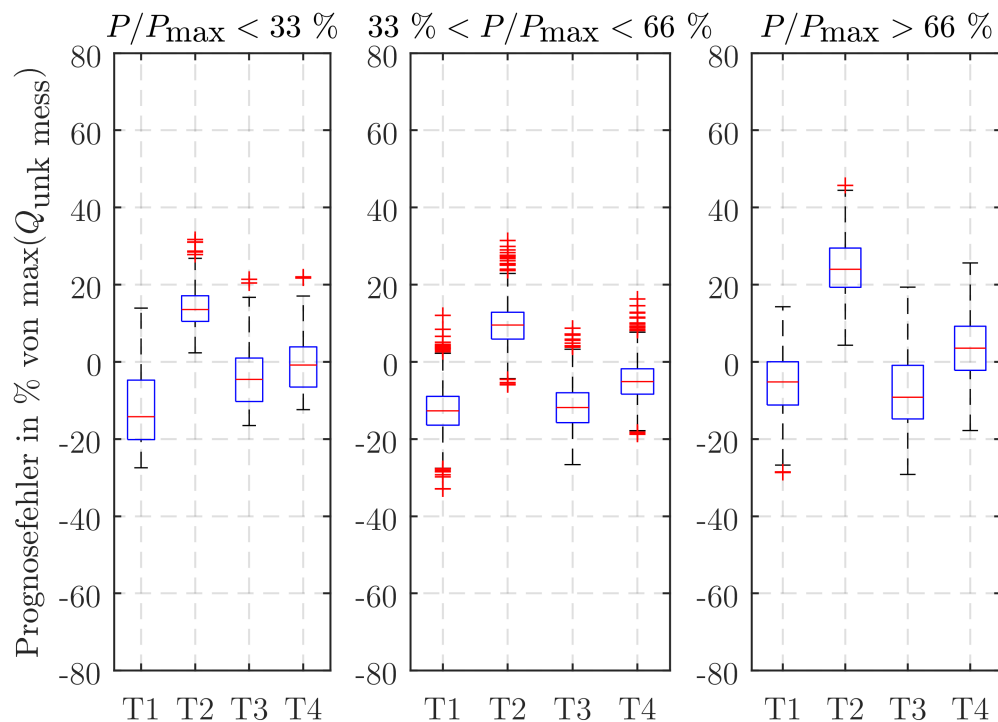


Abbildung A.16: Vergleich des auf den Maximalwert des unkompensierten Verhalten normierten Fehlers verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 1. Der Normierungswerte beträgt 290 kVar.

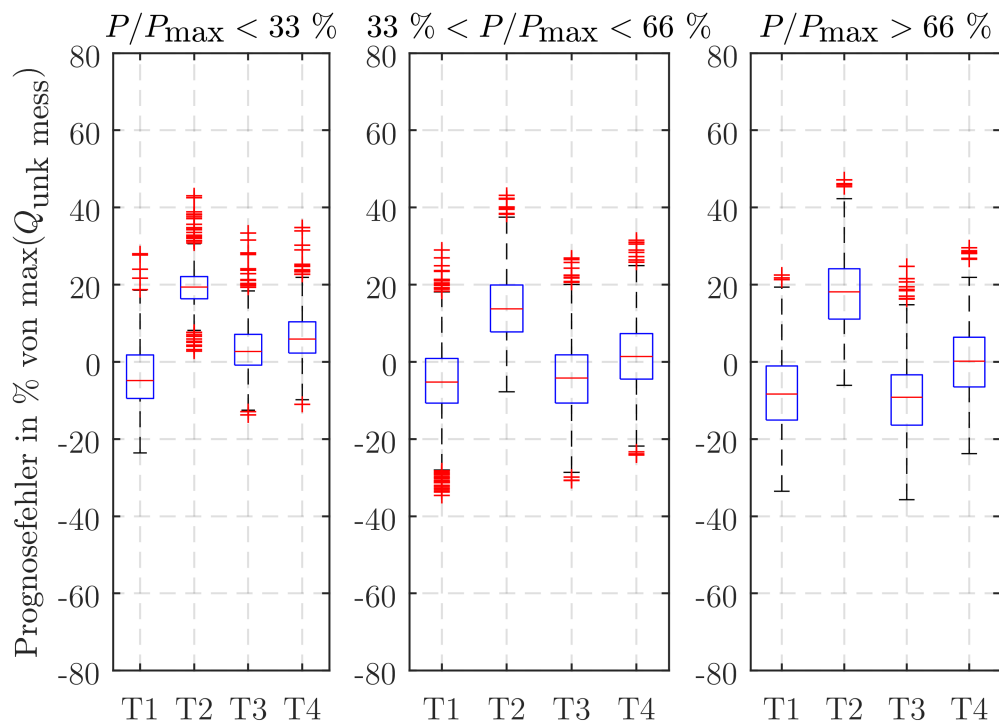


Abbildung A.17: Vergleich des auf den Maximalwert des unkompensierten Verhalten normierten Fehlers verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 2. Der Normierungswerte beträgt 198 kVar.

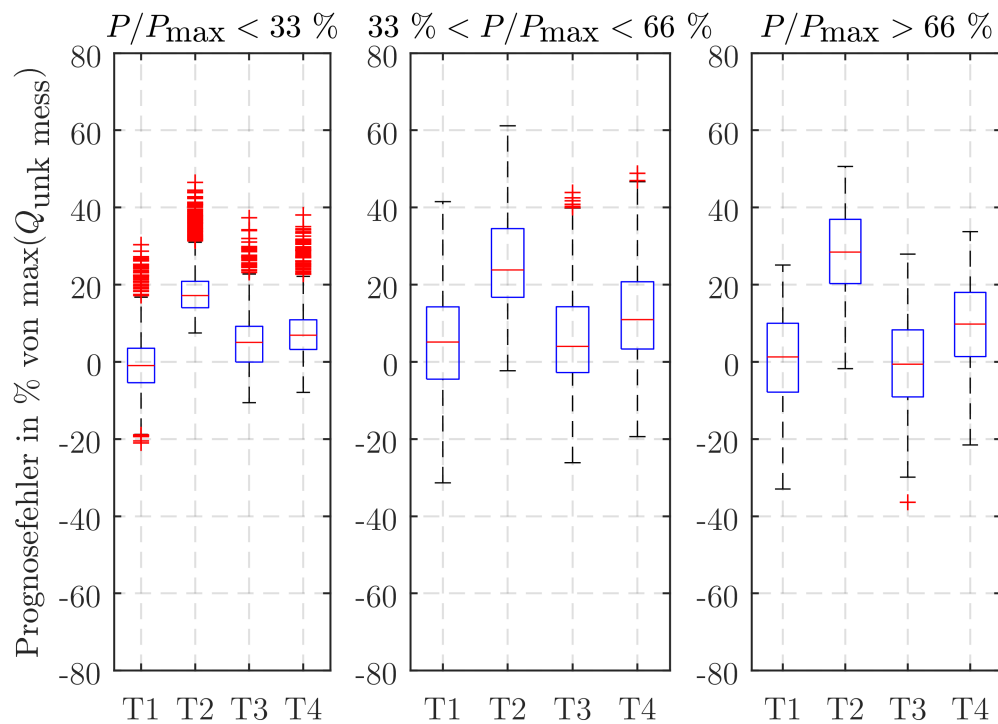


Abbildung A.18: Vergleich des auf den Maximalwert des unkompensierten Verhalten normierten Fehlers verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 3. Der Normierungswert beträgt 145 kVar.

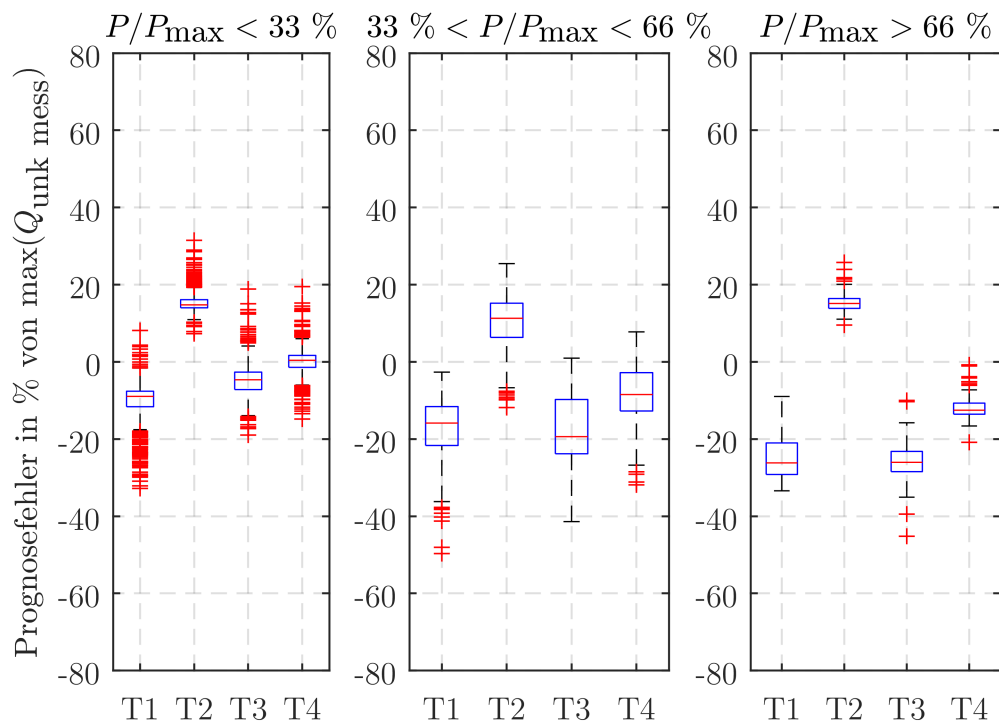


Abbildung A.19: Vergleich des auf den Maximalwert des unkompensierten Verhalten normierten Fehlers verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 4. Der Normierungswert beträgt 191 kVar.

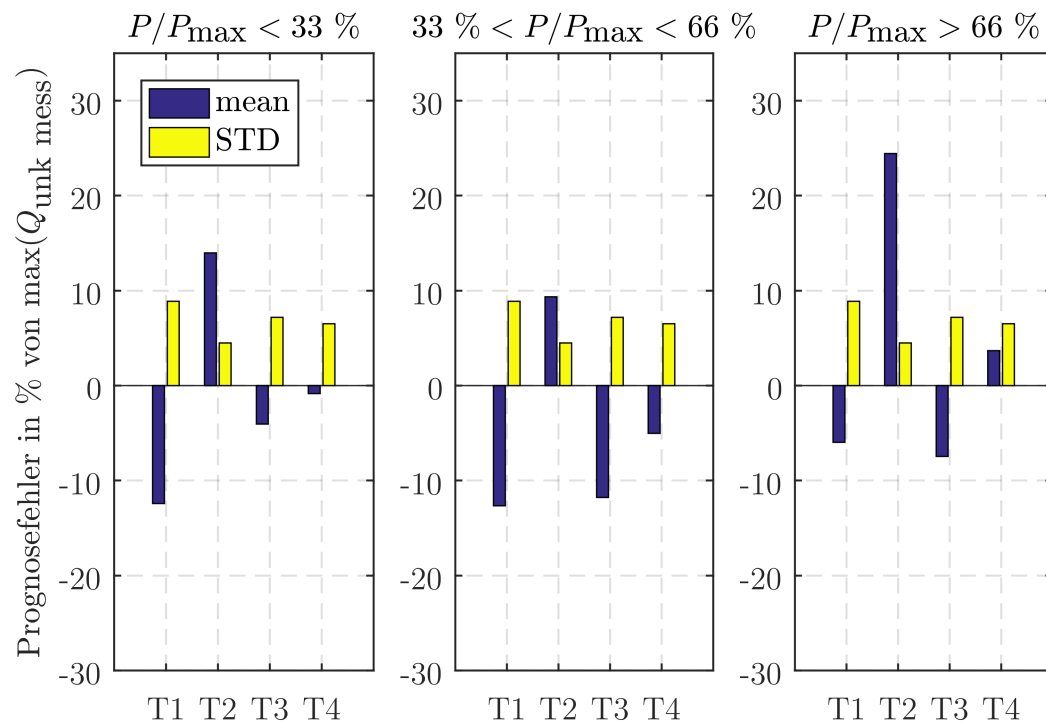


Abbildung A.20: Vergleich des Fehlers (Mittelwert und Standardabweichung) verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 1. Der Normierungswert beträgt 290 kVAr.

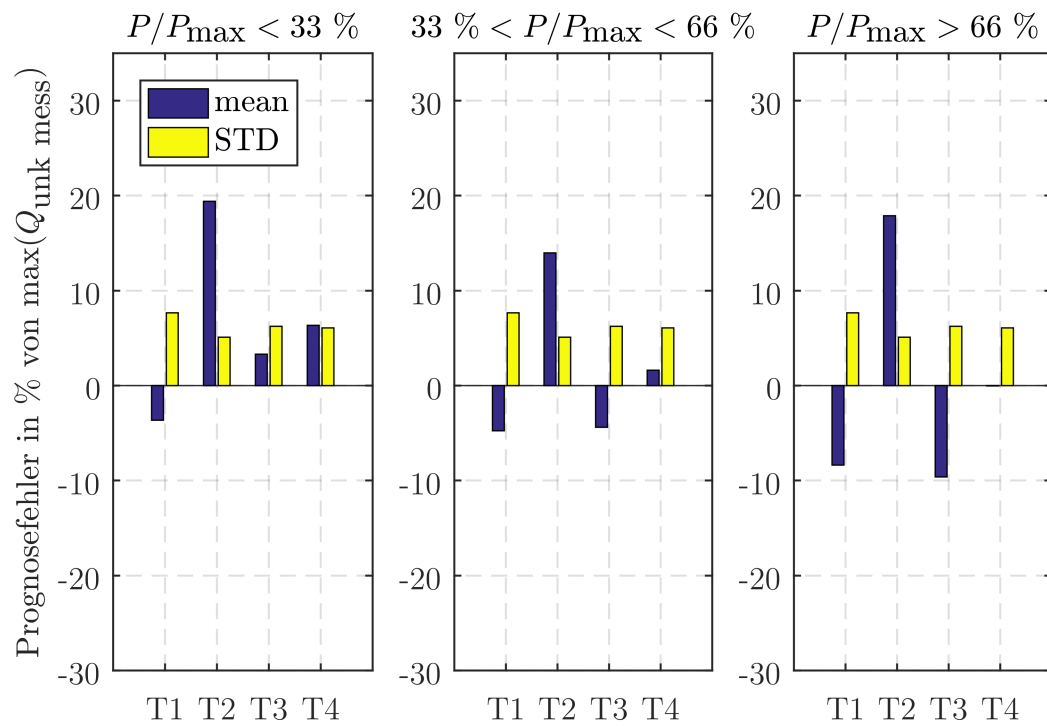


Abbildung A.21: Vergleich des Fehlers (Mittelwert und Standardabweichung) verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 2. Der Normierungswerte beträgt 198 kVar.

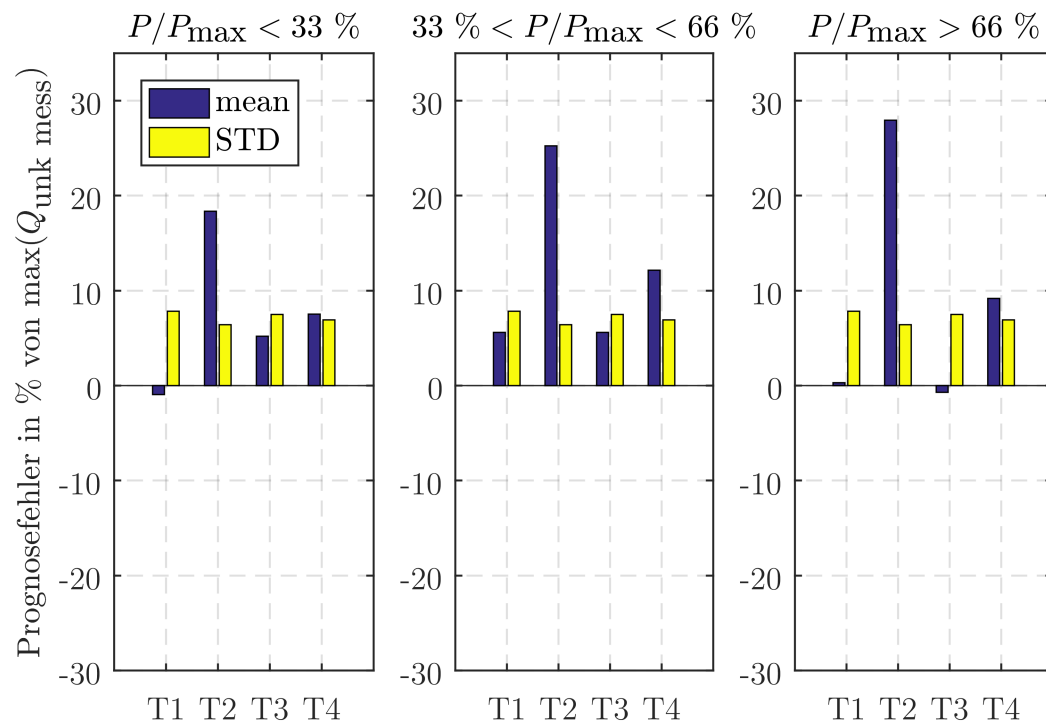


Abbildung A.22: Vergleich des Fehlers (Mittelwert und Standardabweichung) verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 3. Der Normierungswerte beträgt 145 kVAr.

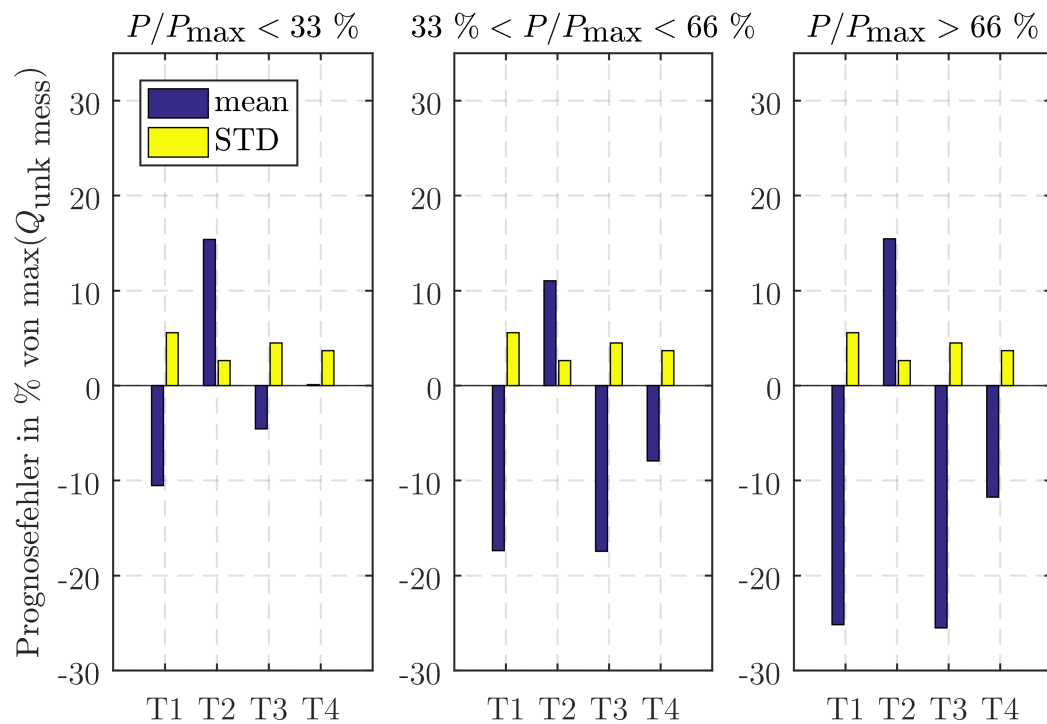


Abbildung A.23: Vergleich des Fehlers (Mittelwert und Standardabweichung) verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 4. Der Normierungswerte beträgt 191 kVar.

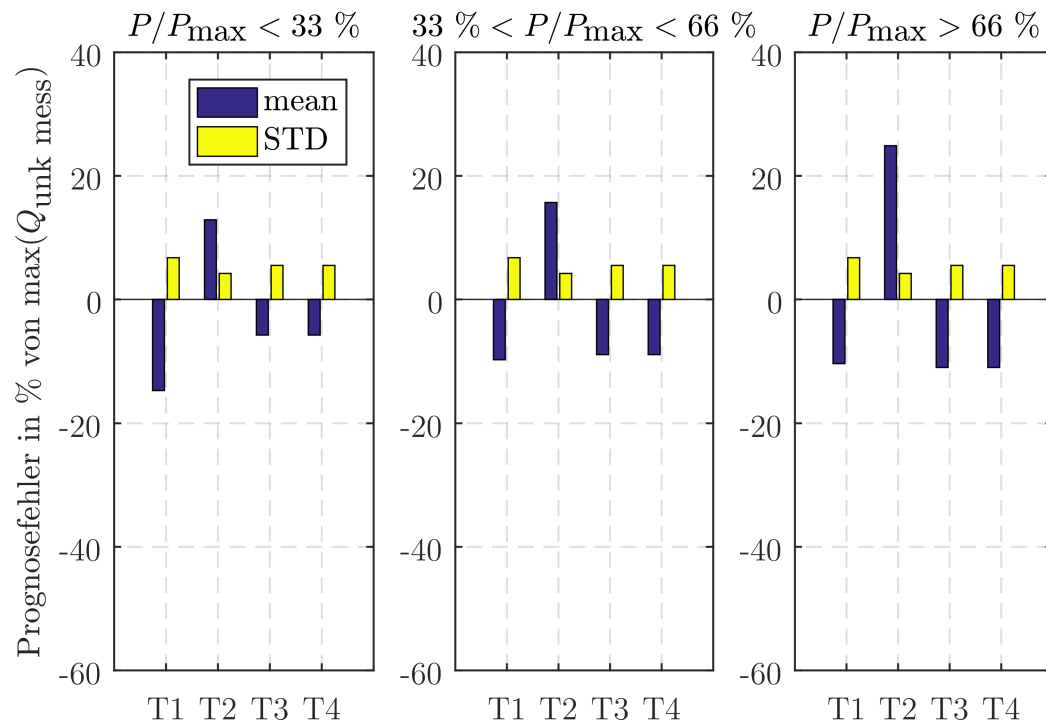


Abbildung A.24: Vergleich des Fehlers (Mittelwert und Standardabweichung) verschiedener Prognosetypen in verschiedenen Wirkleistungsarbeitsbereichen an Messpunkt 5. Der Normierungswerte beträgt 675 kVAr.

Tabelle A.8 und A.9 zeigen die Parameter der in Abschnitt 3.4.4 Abbildung 3.39 durchgeführten Untersuchung zur Abschätzung der Verluste der betriebsinternen Netzbetriebsmitteln von Netzebene 5 und 6.

Tabelle A.8: Parameter der verwendeten Leitungen

Leitung	X in Ω	R in Ω	S_r in MVA
NA2XS2Y 3x1x240	0,18	0,09	19,7
N2YSY 3x1x50	0,14	0,39	0,8

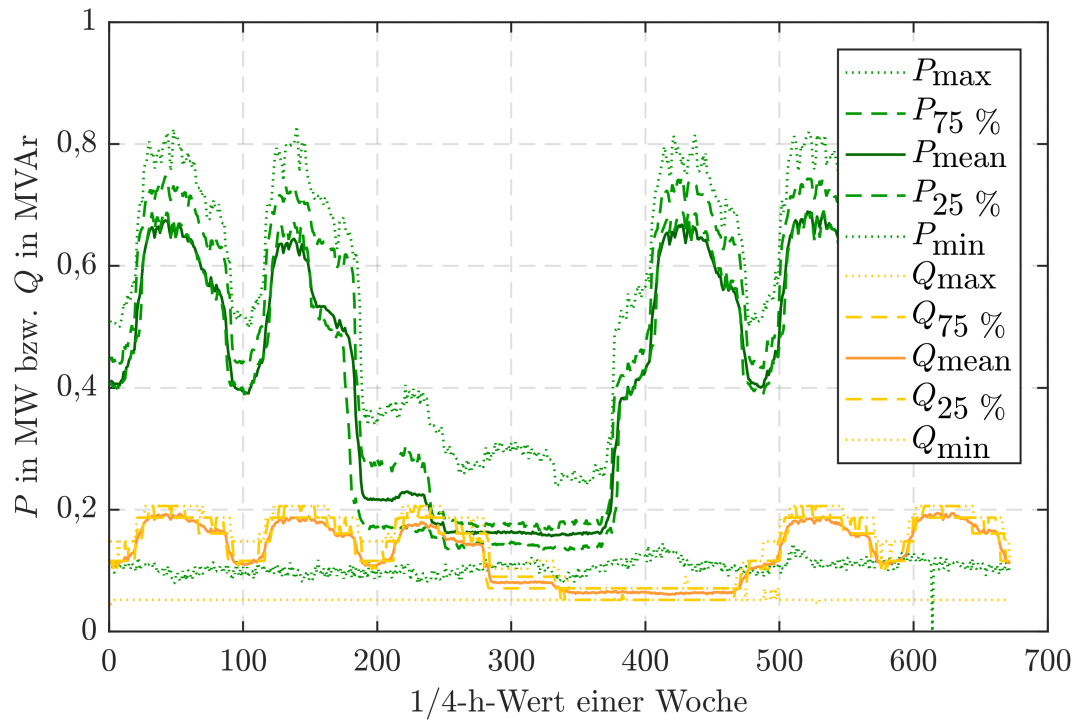
Tabelle A.9: Parameter der verwendeten Transformatoren

Parameter	Wert	
S_r in kVA	630	100
relative Kurzschlussspannung in %	4	4
relativer Leerlaufstrom in %	0,23	0,32
Kupferverluste in kW	4,6	1,25

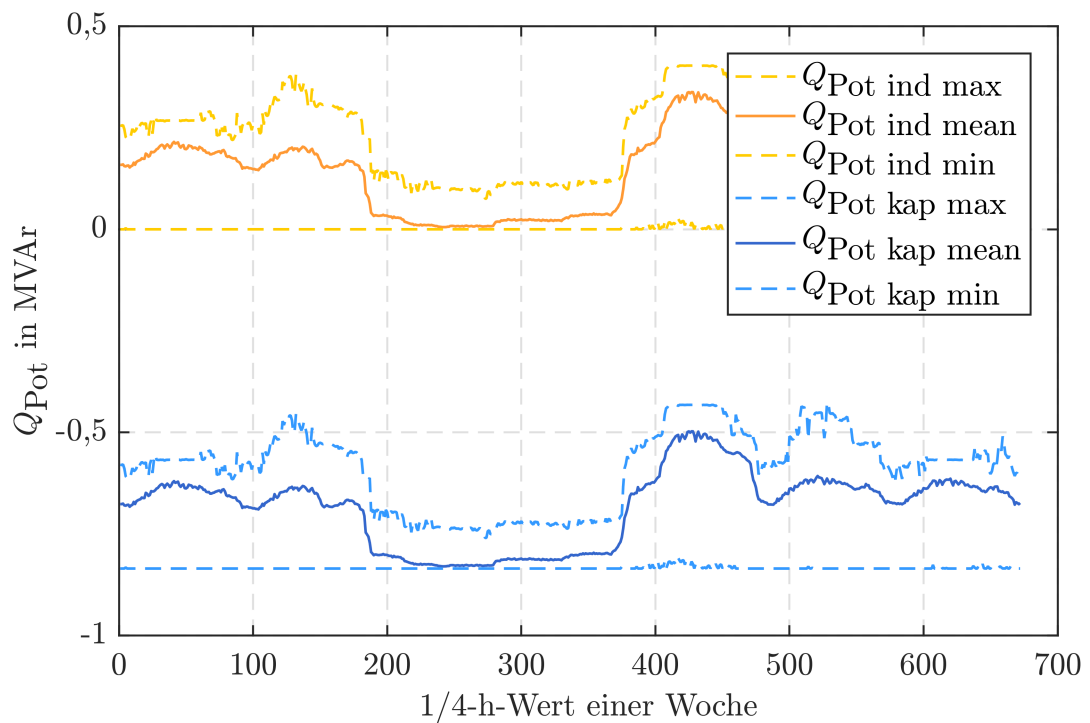
A.13 Zeitverhalten der Betrachteten Betriebe

Im Folgenden werden zu Abschnitt 4.1 ergänzte Grafiken dargestellt, die dort sinngemäß erläutert werden.

Das Wirk-Blindleistungsverhalten sowie das induktive und kapazitive Blindleistungspotenzial von Betrieb 1 bis 3 sind in Abbildung A.25 bis A.30 dargestellt (Extrema und mittlere Werte je $\frac{1}{4}$ -Stunde einer Woche). Die Daten beziehen sich auf das Jahr 2015, das an einem Donnerstag beginnt. Der Leistungseinbruch bei einem Wert von ca. 180 kennzeichnet den Beginn des Wochenendes.

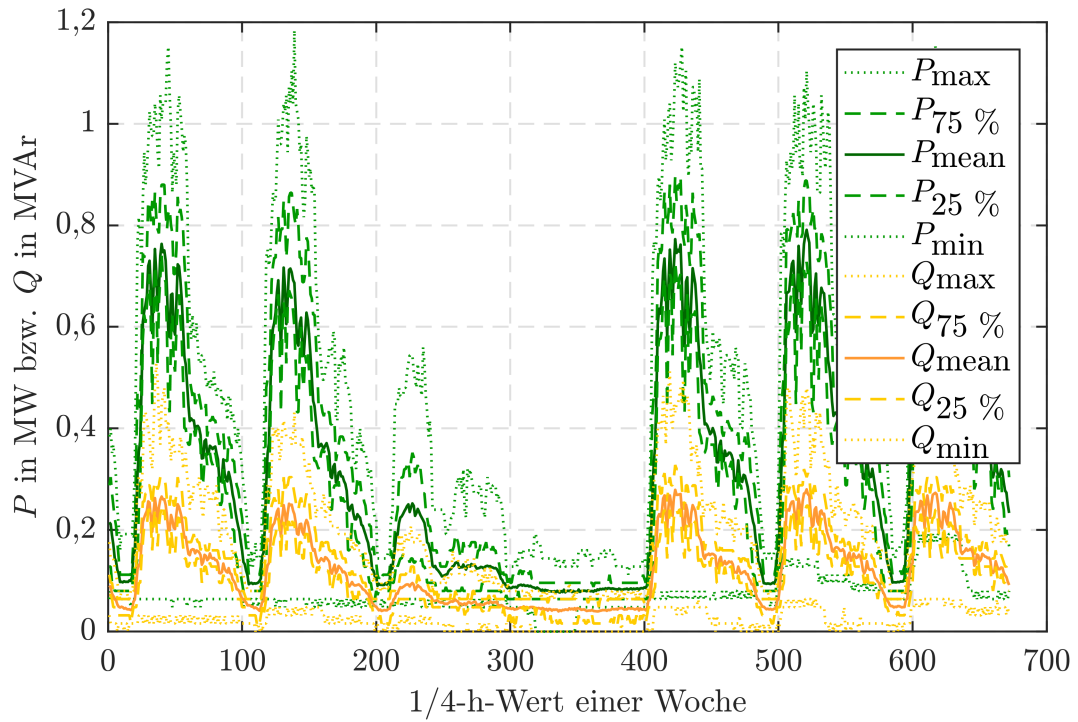


(a) Wirk-Blindleistungsverhalten

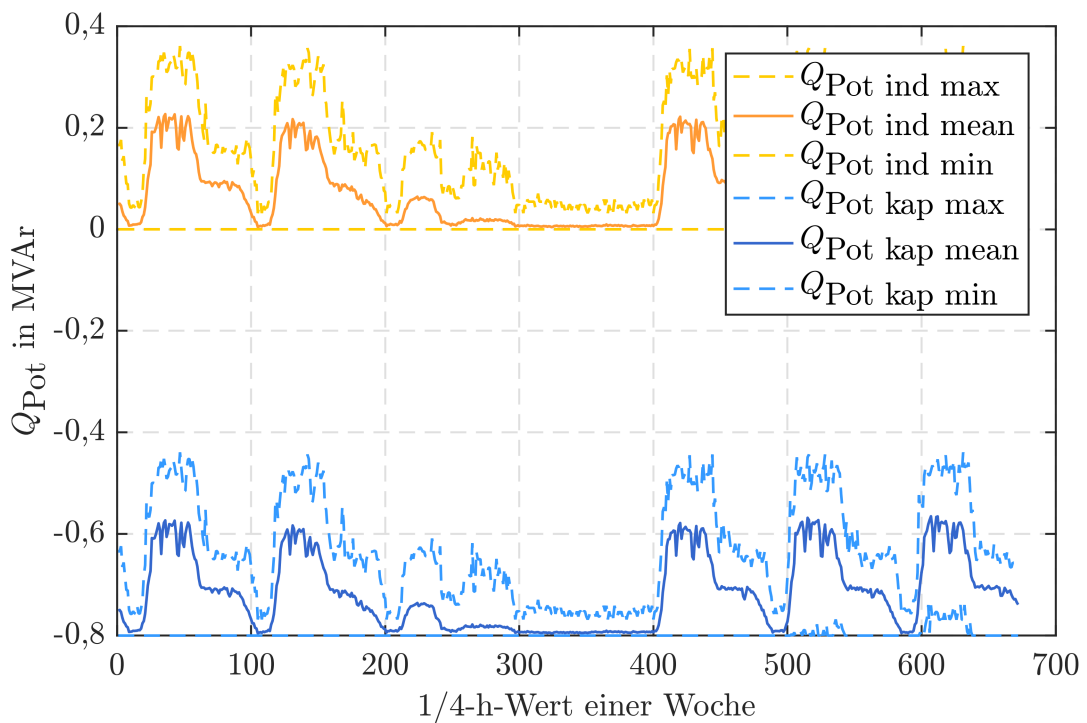


(b) Blindleistungspotenzial

Abbildung A.25: Wirk-Blindleistungsverhalten und induktives/kapazitives Blindleistungspotenzial von Betrieb 1.

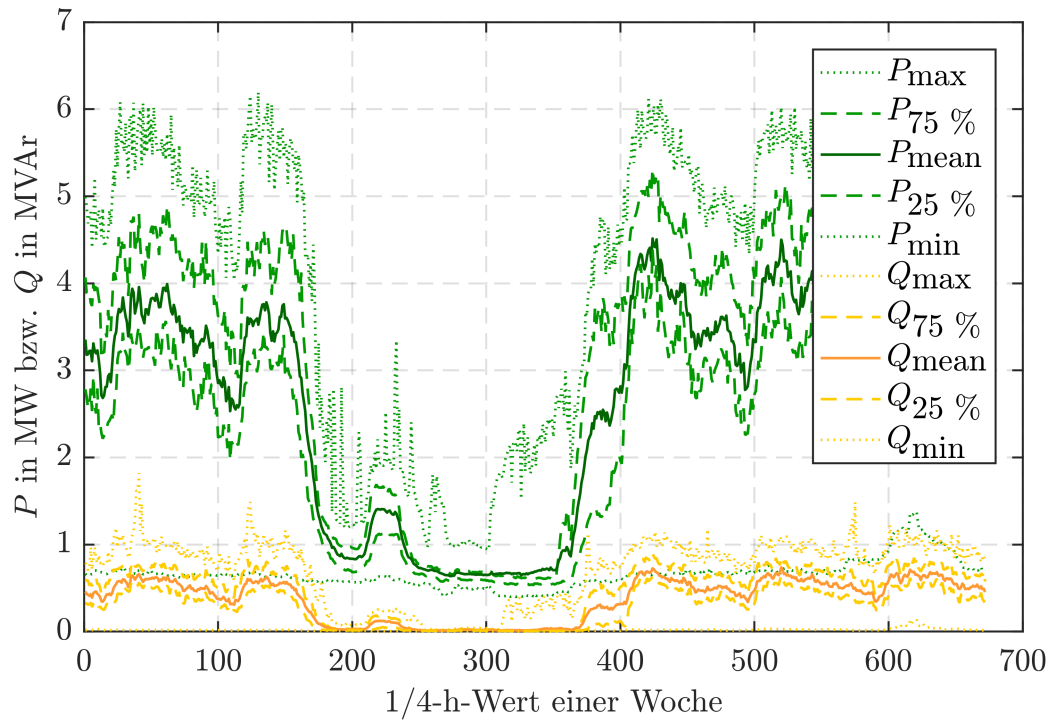


(a) Wirk-Blindleistungsverhalten

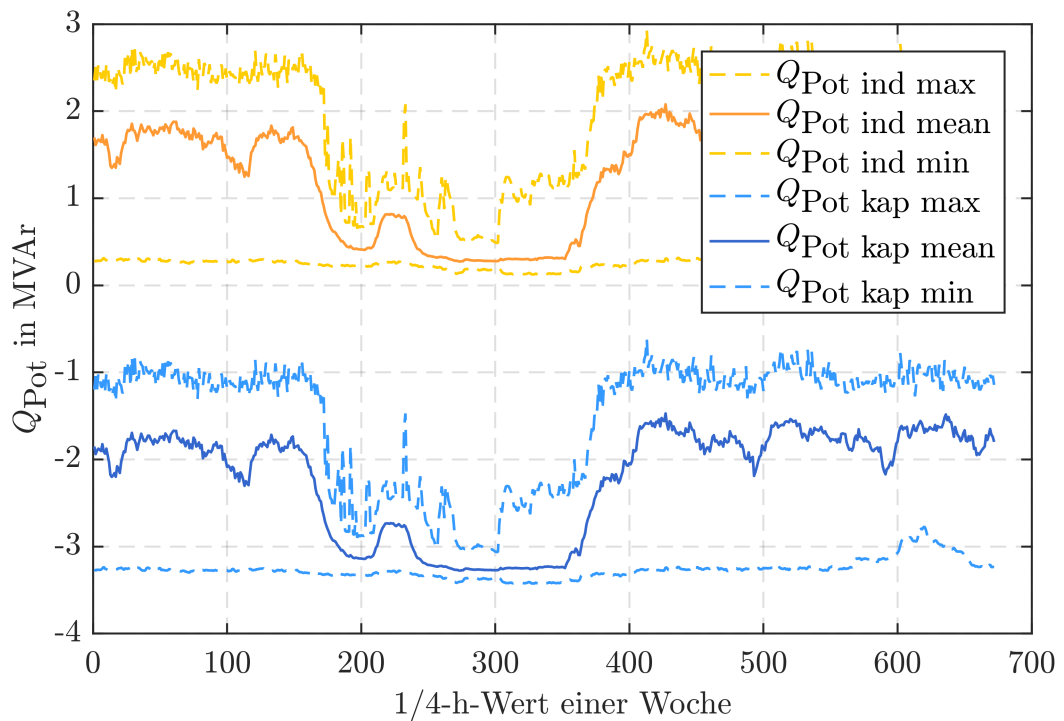


(b) Blindleistungspotenzial

Abbildung A.26: Wirk-Blindleistungsverhalten und induktives/kapazitives Blindleistungspotenzial von Betrieb 2.

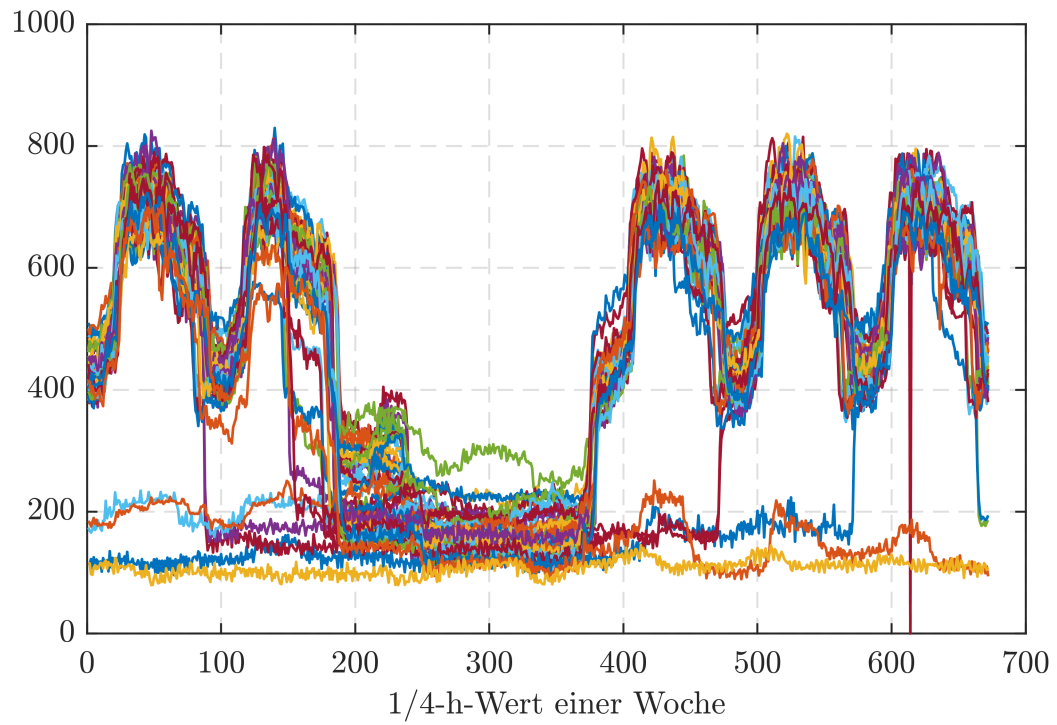


(a) Wirk-Blindleistungsverhalten

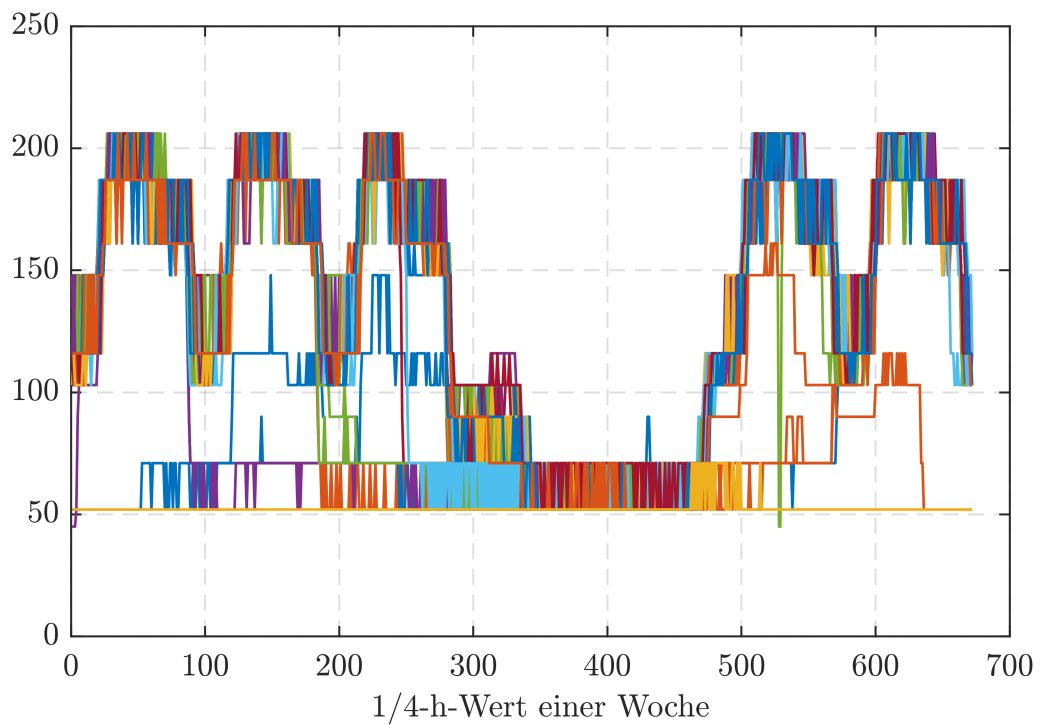


(b) Blindleistungspotenzial

Abbildung A.27: Wirk-Blindleistungsverhalten und induktives/kapazitives Blindleistungspotenzial von Betrieb 3.



(a) Wirkleistungsverhalten



(b) Blindleistungsverhalten

Abbildung A.28: Wirk-Blindleistungsverhalten von Betrieb 1 je Woche des Jahres 2015, basierend auf Messdaten des Netzbetreibers in Form von 15-Minuten-Mittelwerten.

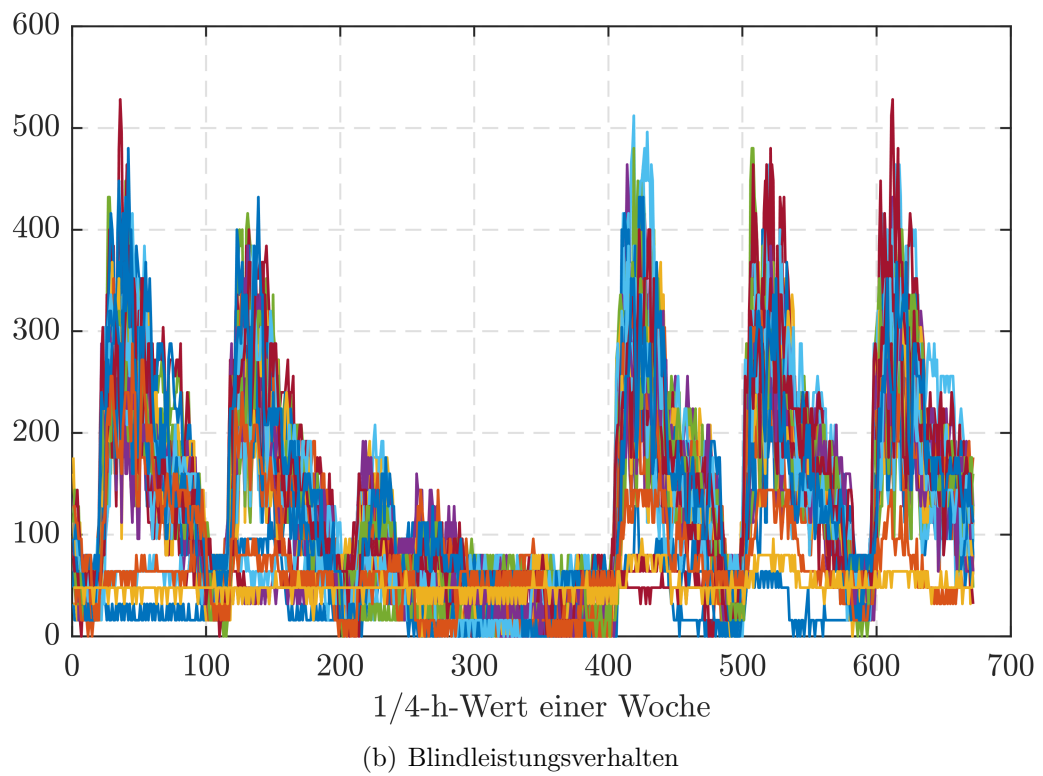
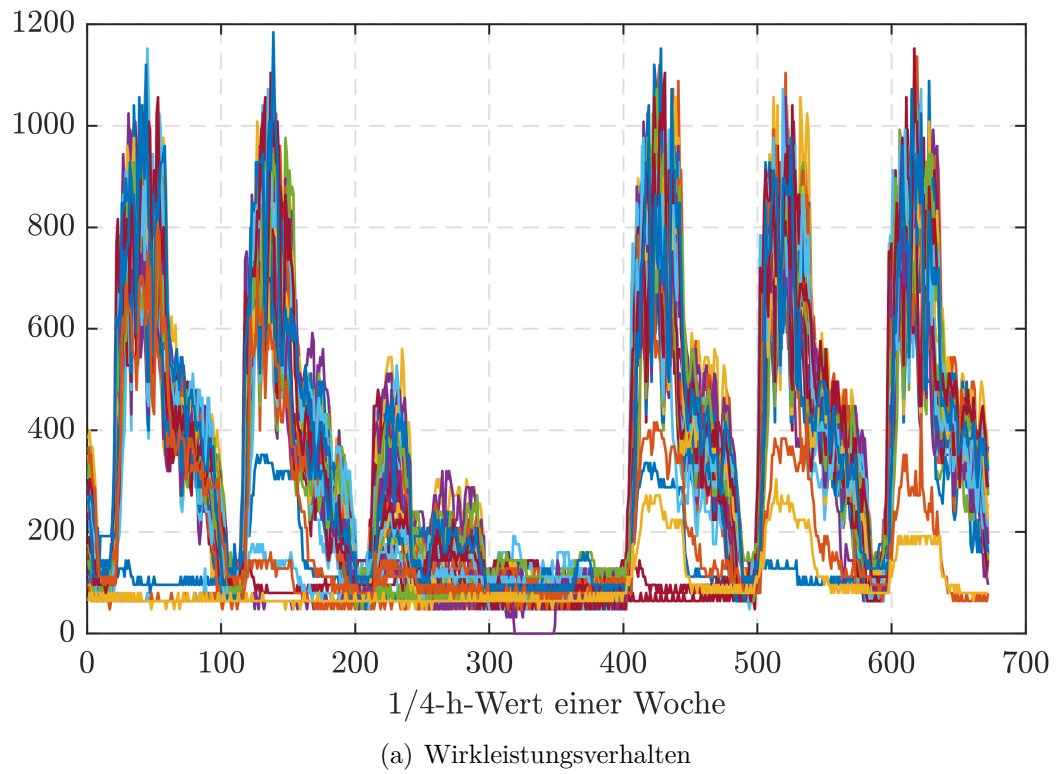
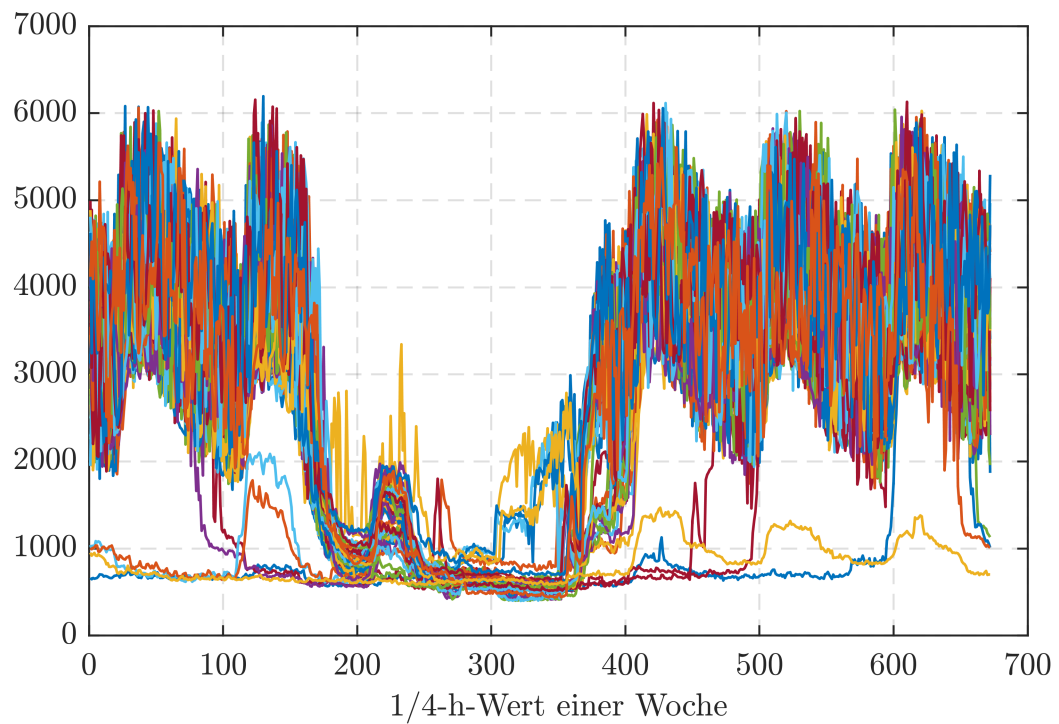
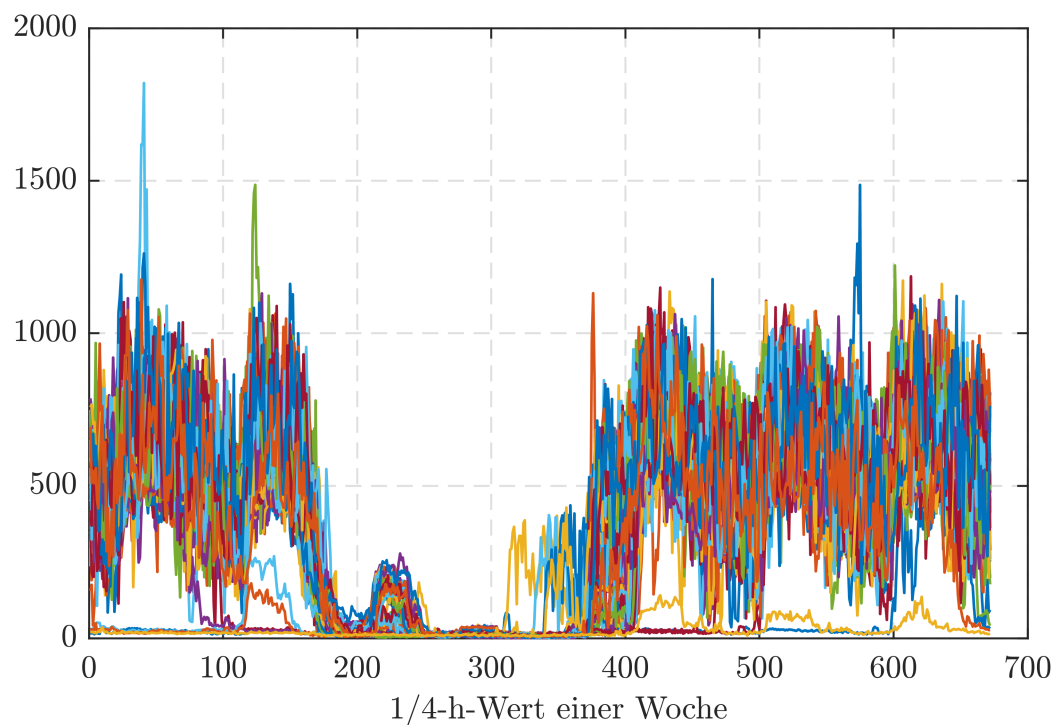


Abbildung A.29: Wirk-Blindleistungsverhalten von Betrieb 2 je Woche des Jahres 2015, basierend auf Messdaten des Netzbetreibers in Form von 15-Minuten-Mittelwerten.



(a) Wirkleistungsverhalten

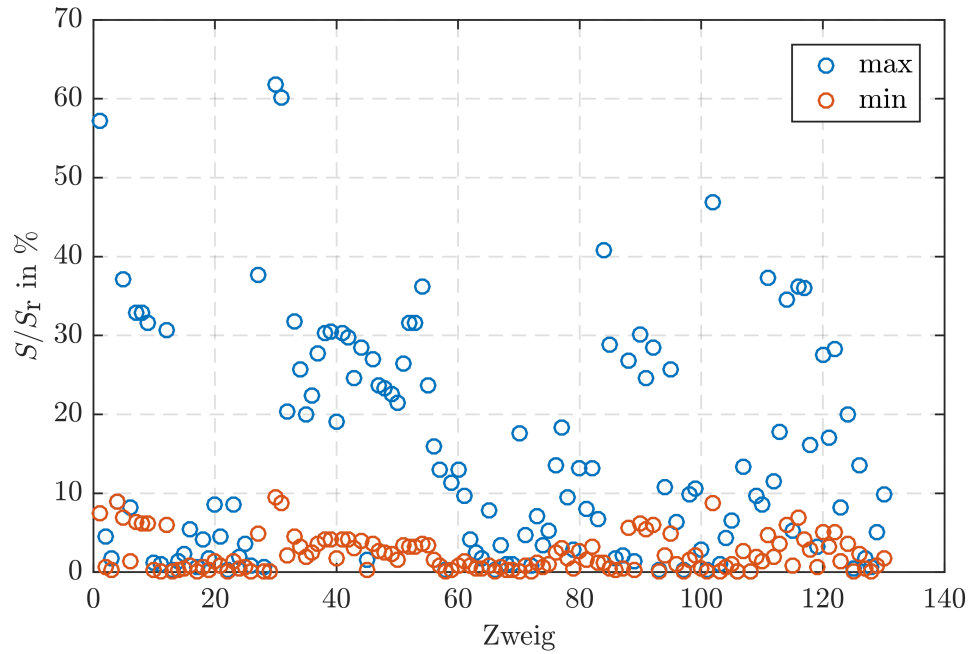


(b) Blindleistungsverhalten

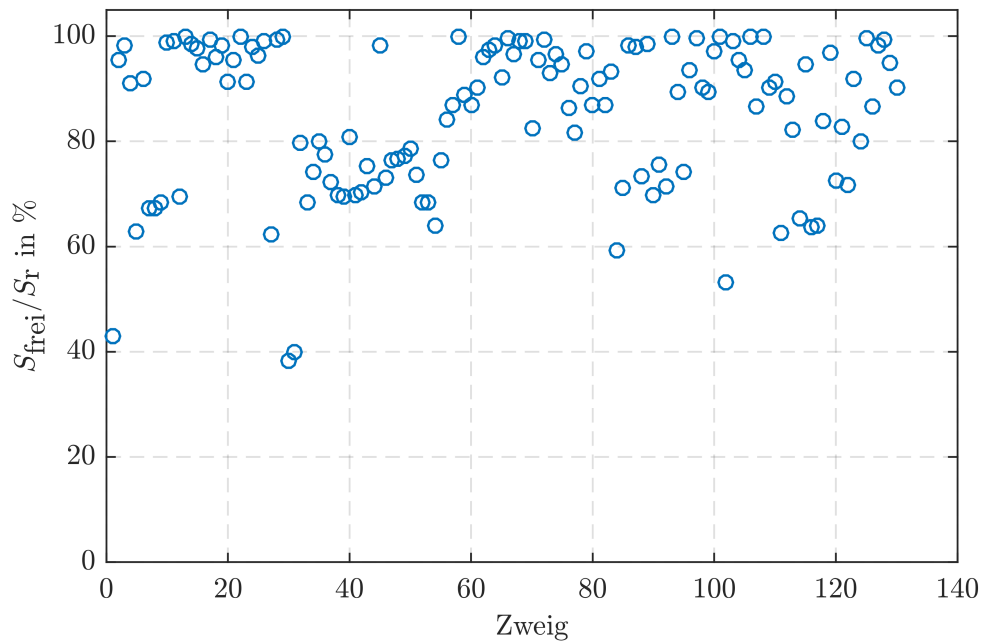
Abbildung A.30: Wirk-Blindleistungsverhalten von Betrieb 3 je Woche des Jahres 2015, basierend auf Messdaten des Netzbetreibers in Form von 15-Minuten-Mittelwerten.

A.14 Kennzahlen des Beispielnetzes im unbeeinflussten Zustand

Im Folgenden werden zu Abschnitt 4.3.1 ergänzte Grafiken dargestellt, die dort sinngemäß erläutert werden.

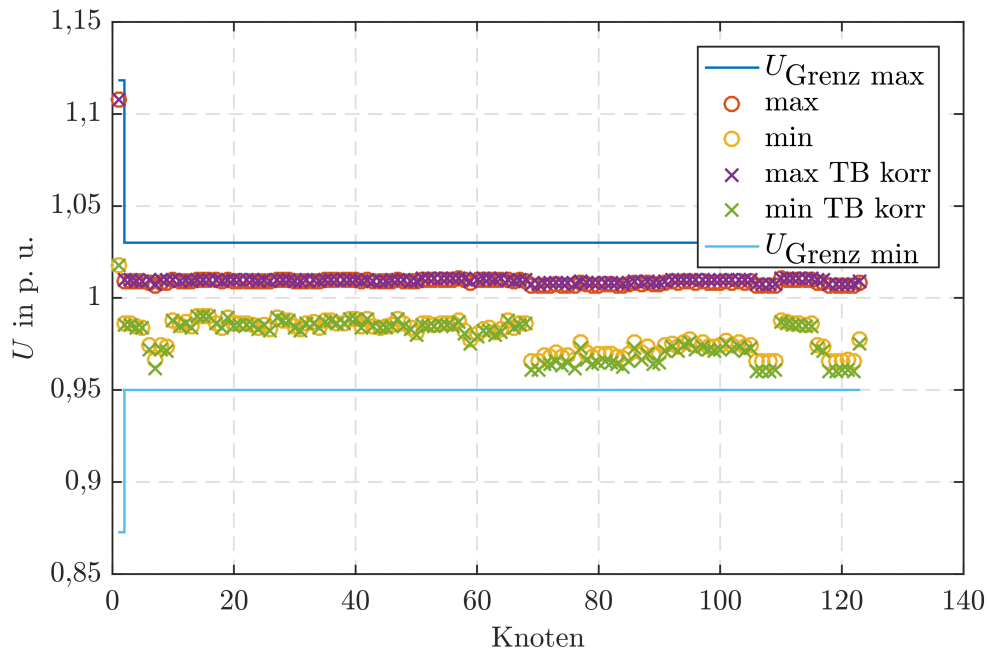


(a) Auslastung der Zweigelemente

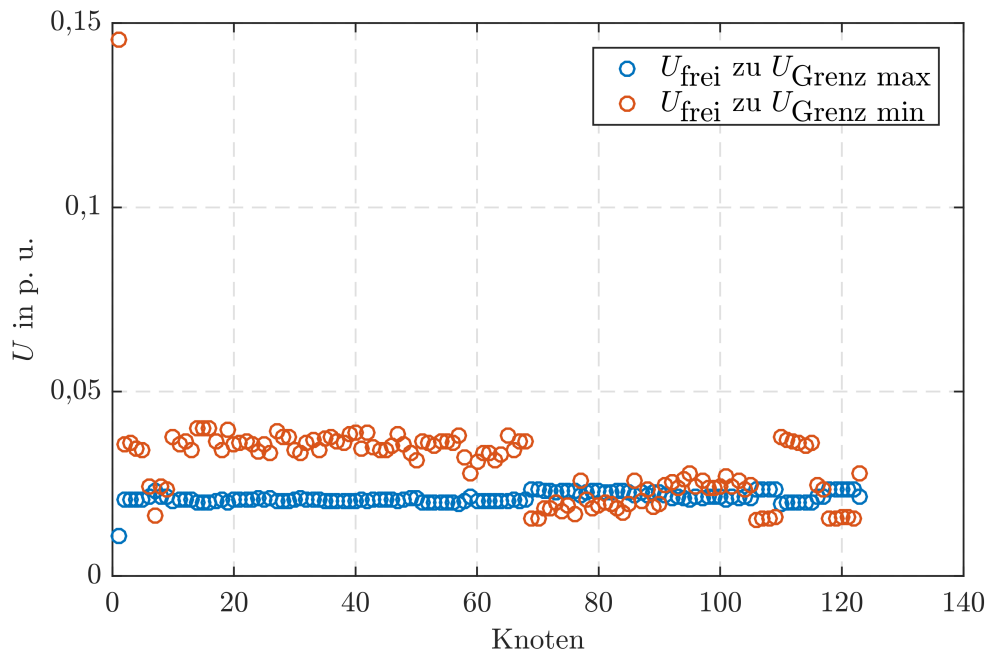


(b) Auslastungsfreiräume der Zweigelemente

Abbildung A.31: Auslastungen und Auslastungsfreiräume der Zweigelemente im unbeeinflussten Zustand.

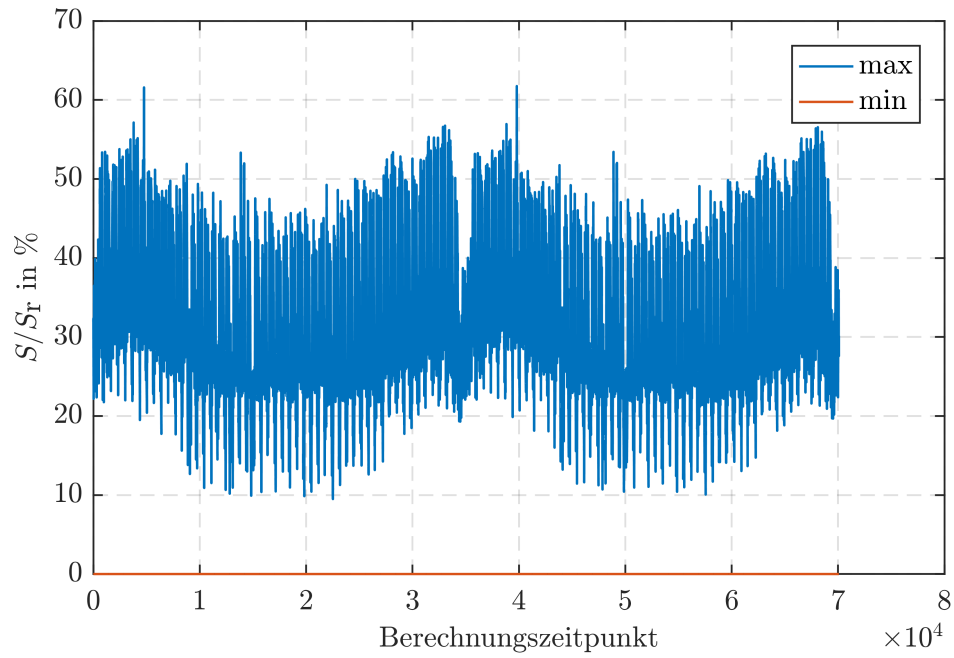


(a) Spannungsniveau der Knotenelemente

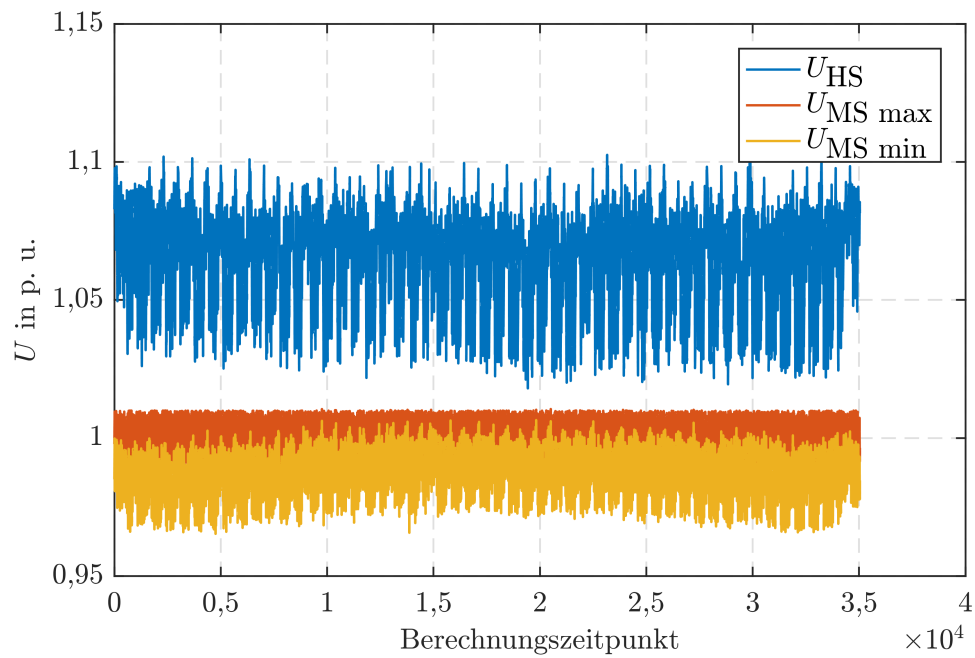


(b) Spannungsfreiräume der Knotenelemente

Abbildung A.32: Spannungsniveau und Spannungsfreiräume der Knotenelemente im unbeeinflussten Zustand ohne und mit korrigierten Totbandeinfluss des Stufenschalters.



(a) Zweigauslastung



(b) Spannungsniveau an Knoten

Abbildung A.33: Extrema der Zweigauslastung und Spannungsniveaus.

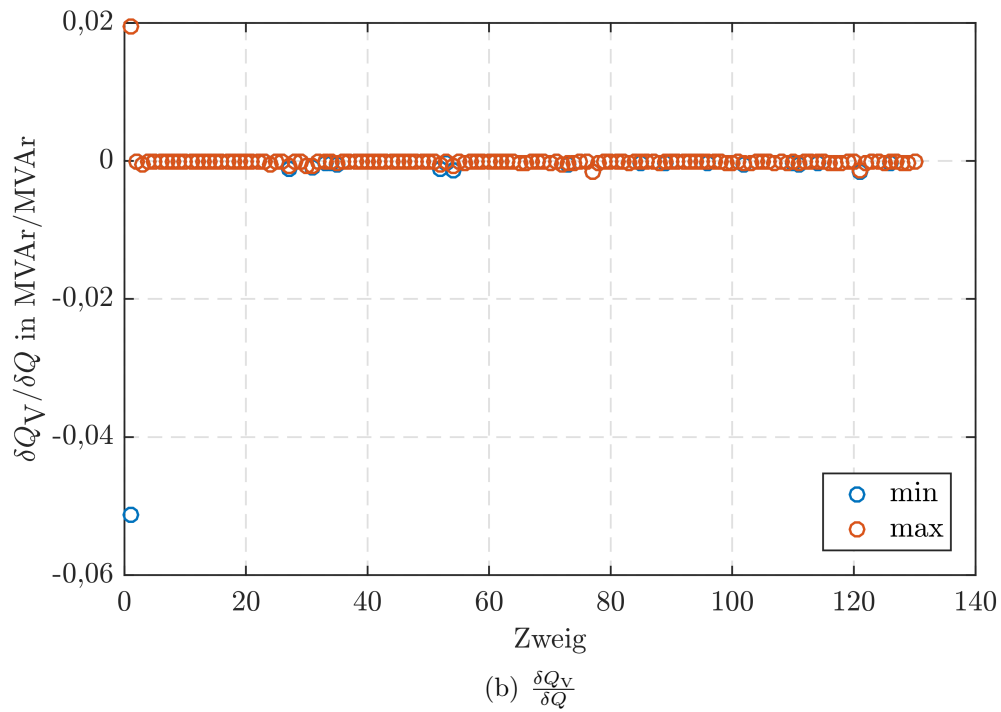
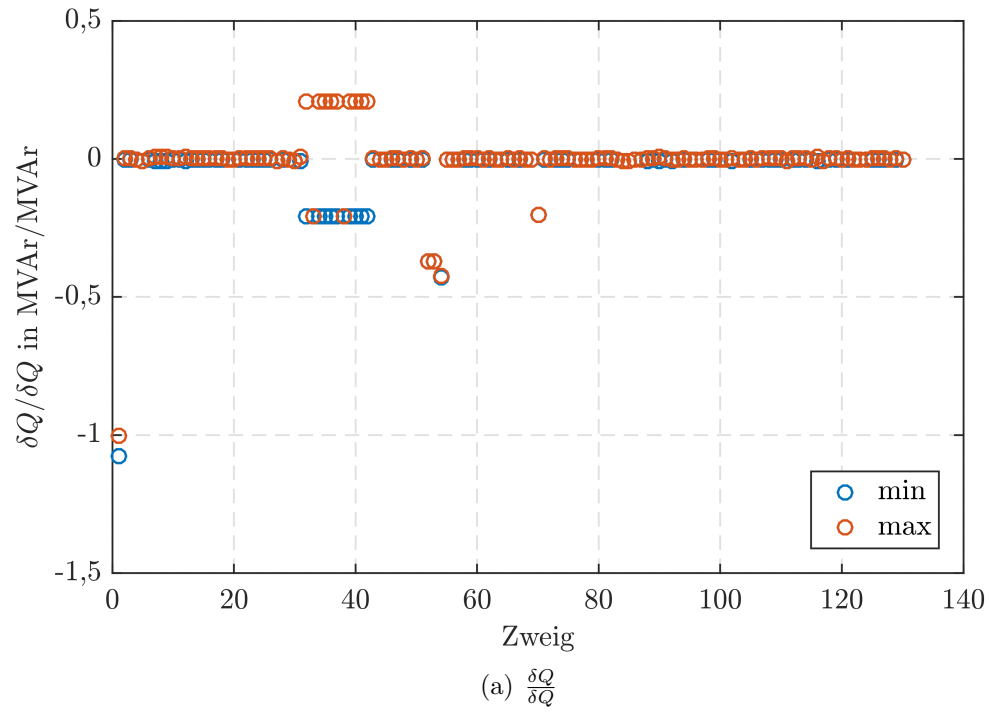


Abbildung A.34: Sensitivitätswerte der Blindleistungsflüsse und -Verluste an Zweigelementen bezogen auf Betrieb 3.

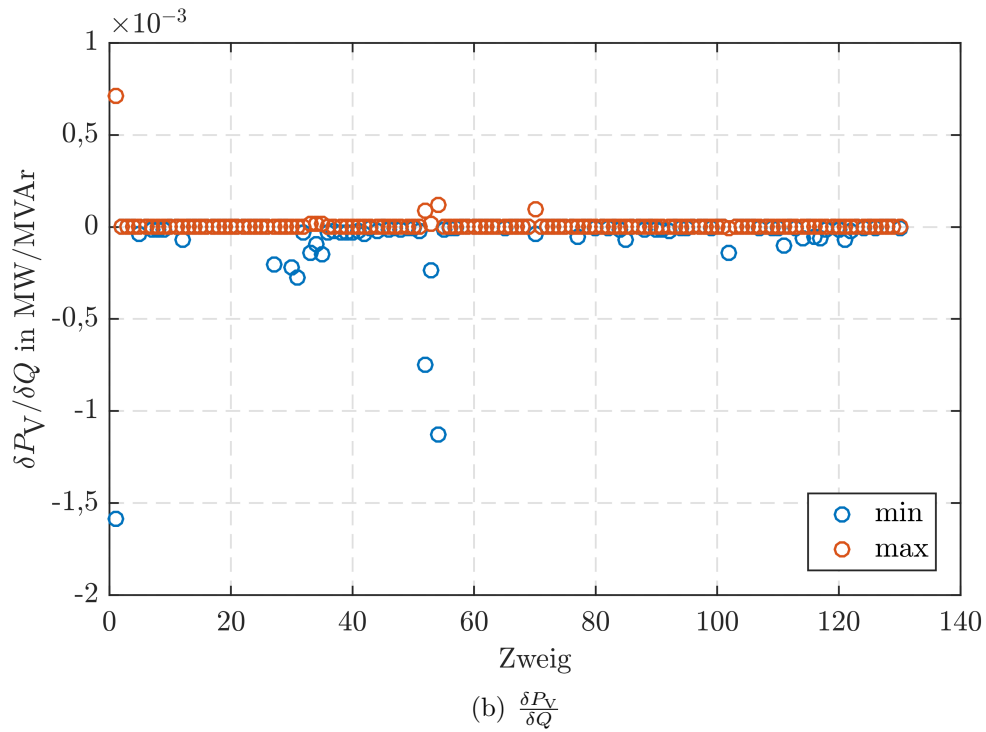
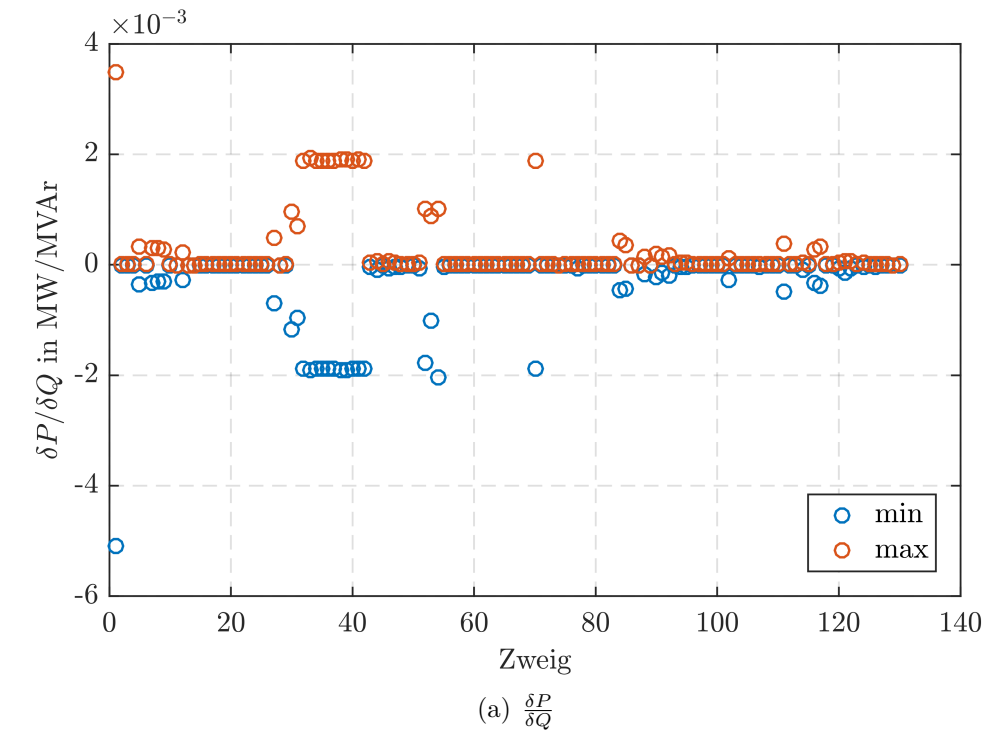


Abbildung A.35: Sensitivitätswerte der Wirkleistungsflüsse und -Verluste an Zweigelementen bezogen auf Betrieb 3.

A.15 Kennzahlen des Beispielnetzes im Szenario S1_1

Im Folgenden werden zu Abschnitt 4.3.2 ergänzte Grafiken dargestellt, die dort sinngemäß erläutert werden.

Die in Abbildung A.36 dargestellt maximal zulässige abrufbare Blindleistung je Eingriffs-klasse, weist Lücken auf, da nicht alle Eingriffs-klassen mit Arbeitspunkten der Netzgruppe besetzt sind.

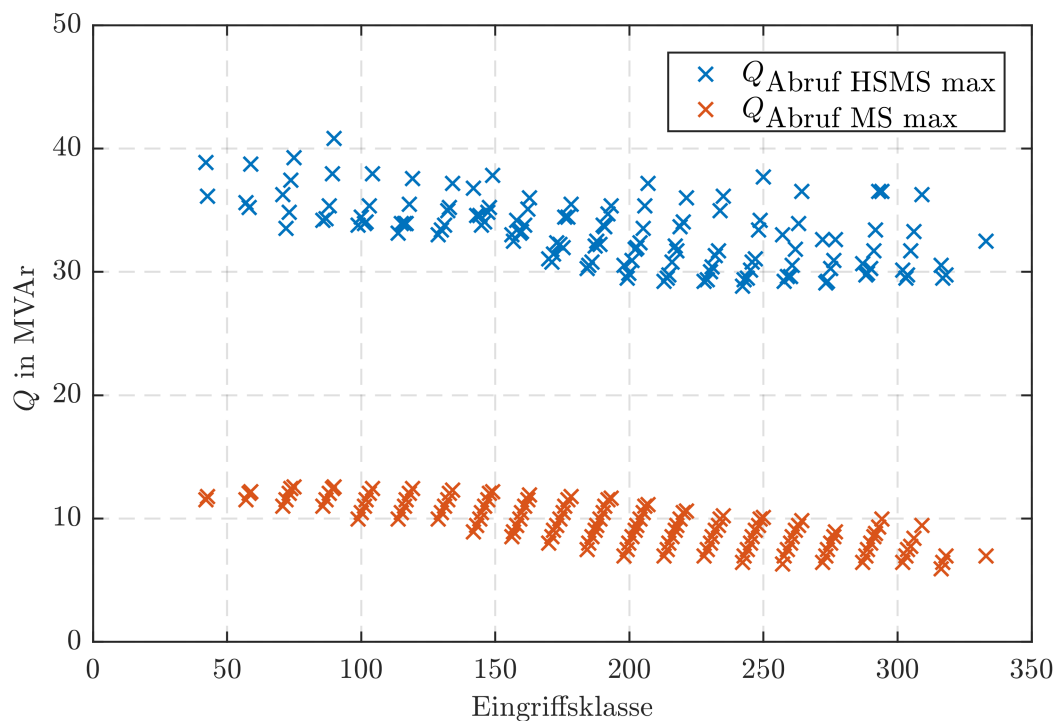


Abbildung A.36: Maximal abrufbare Blindleistung je Eingriffs-klasse.

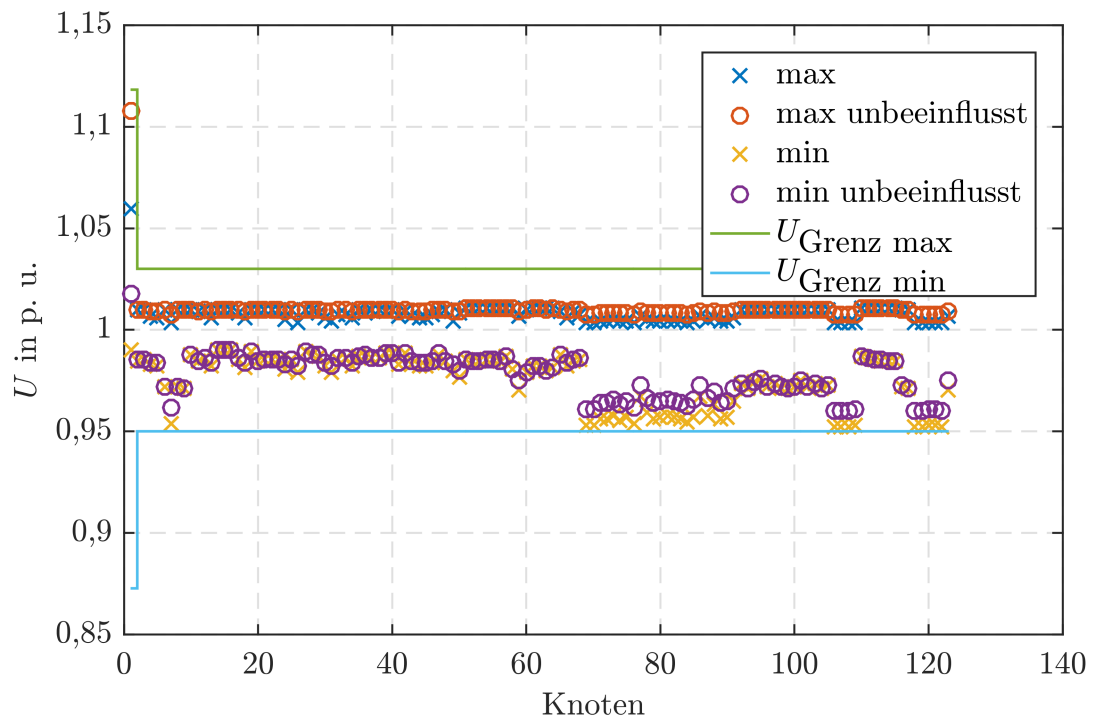


Abbildung A.37: Spannungsextrema je Knotenelement ohne und mit Blindleistungsabruf sowie mit korrigierten Totbandeinfluss des Stufenschalters.

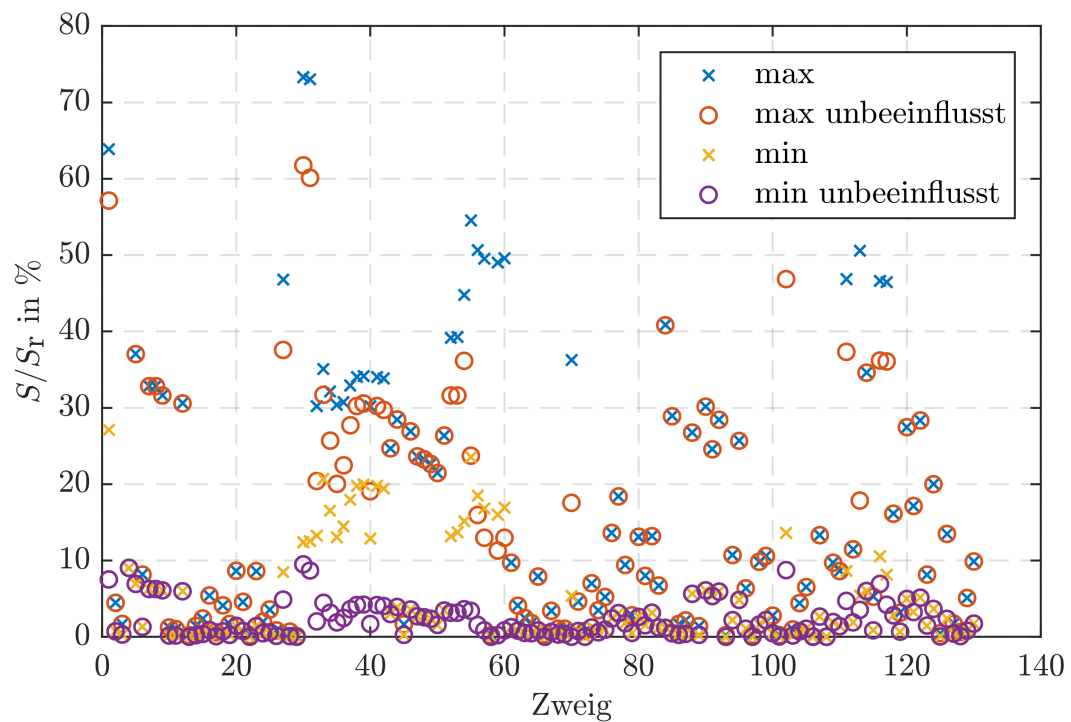


Abbildung A.38: Auslastungsextrema je Zweigelement ohne und mit Blindleistungsabruf.

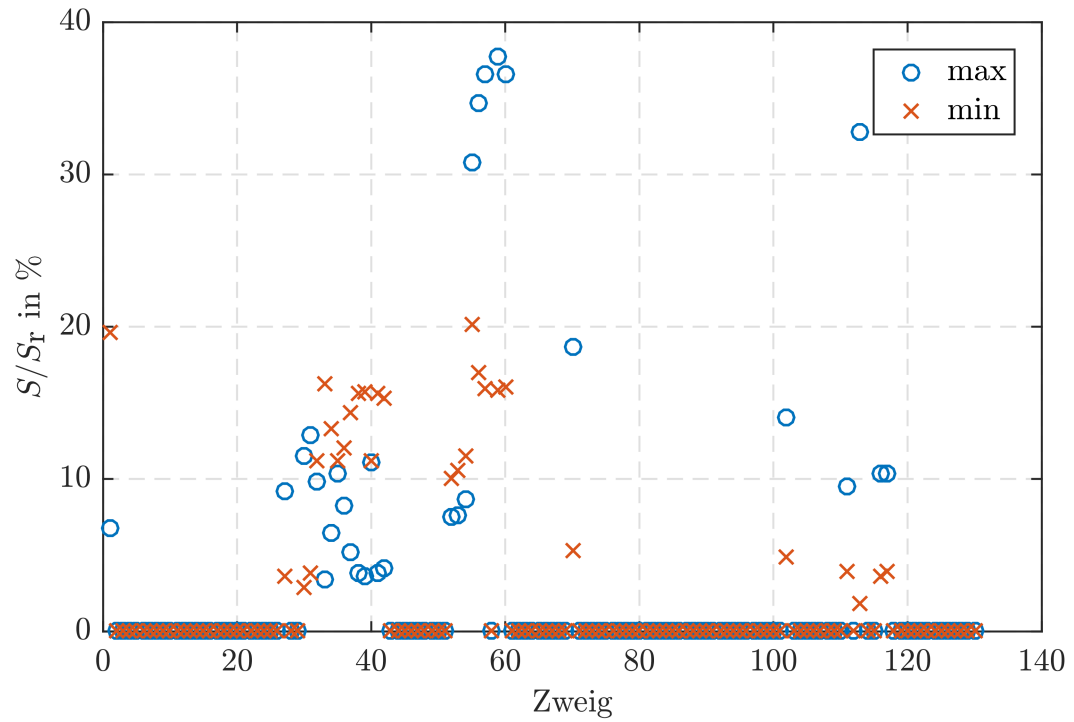


Abbildung A.39: Extrema der Auslastungsänderung je Zweigelement.

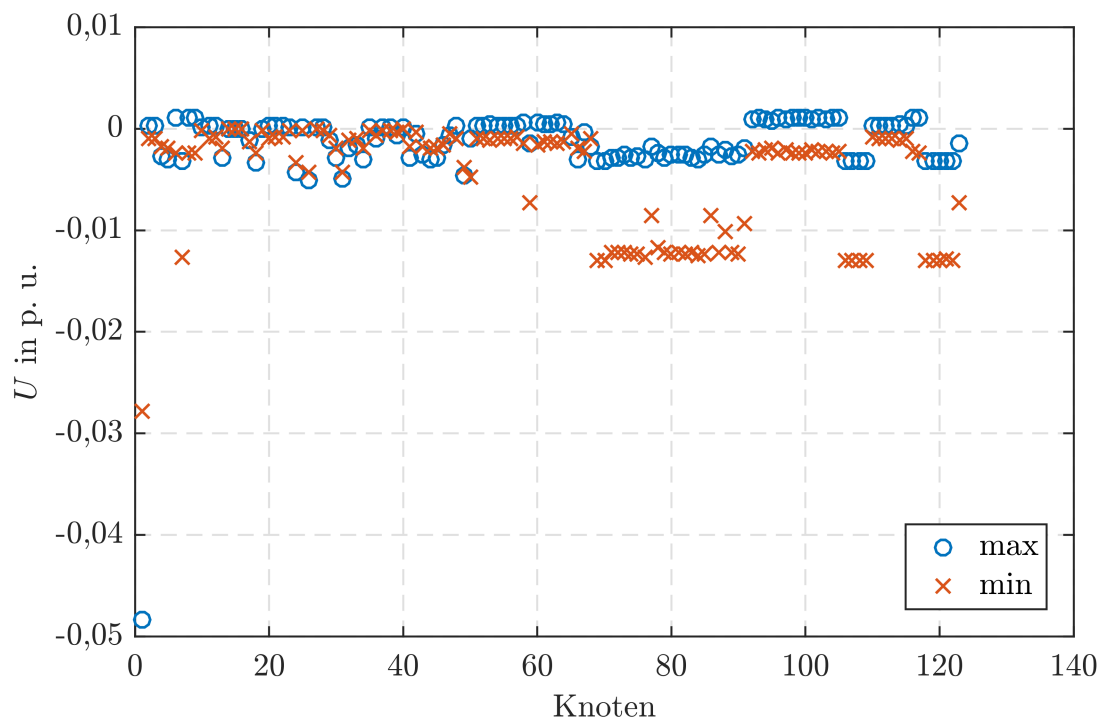


Abbildung A.40: Extrema der Spannungsänderung je Knotenelement mit korrigierten Totbandeinfluss des Stufenschalters.

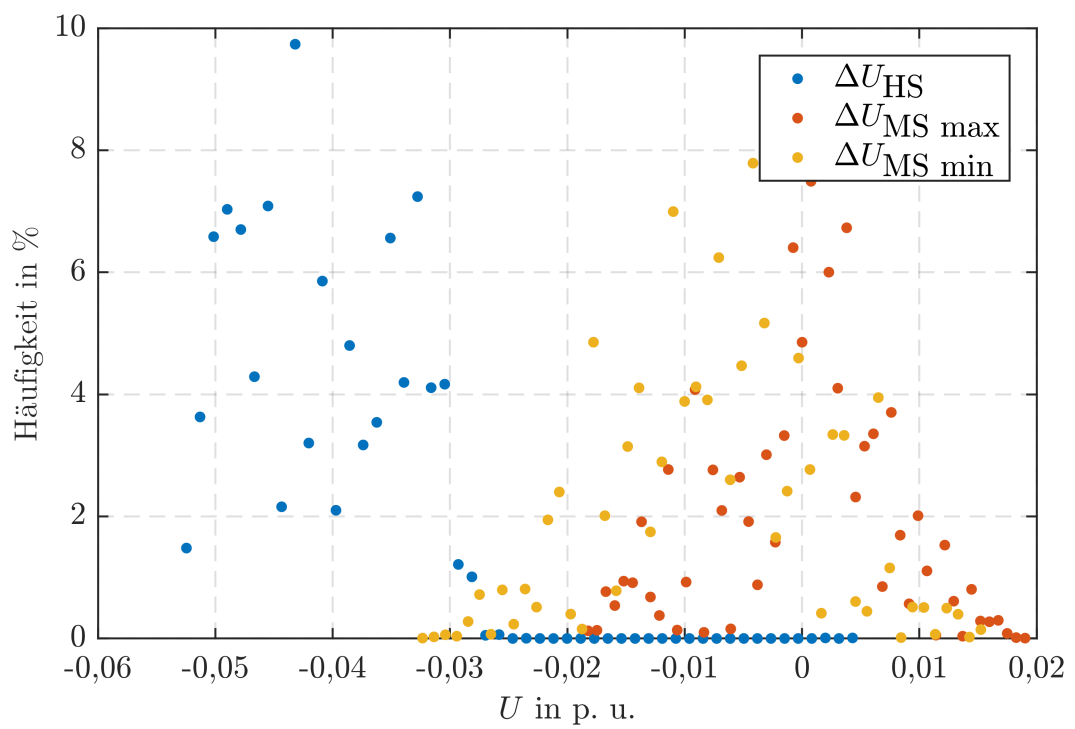


Abbildung A.41: Häufigkeit der Extrema der Spannungsänderung an Konten-
elementen ohne korrigierten Totbandeinfluss des Stufenschalt-
ters.

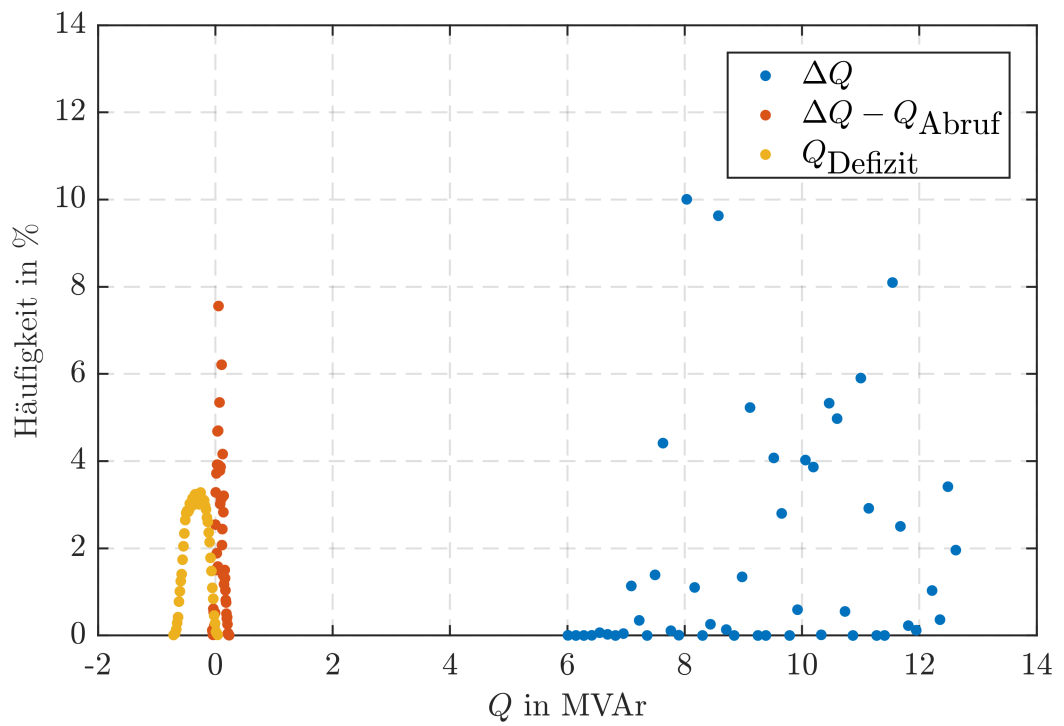


Abbildung A.42: Häufigkeit der Blindleistungsänderung, der Abweichung der Blindleistungsänderung zum geplanten Blindleistungsabruf und des resultierenden Blindleistungsdefizits.

A.16 Kennzahlen des Beispielnetzes im Szenario S1_2

Im Folgenden werden zu Abschnitt 4.3.3 ergänzte Grafiken dargestellt, die dort sinngemäß erläutert werden.

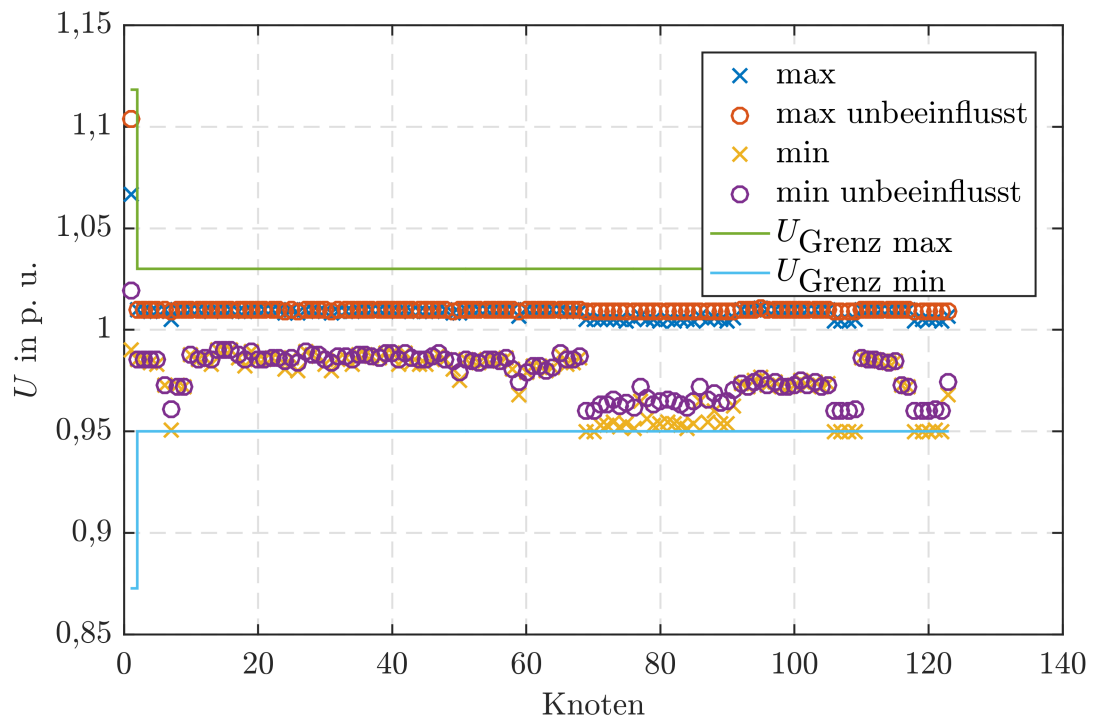


Abbildung A.43: Spannungsextrema je Knotenelement ohne und mit Blindleistungsabruf sowie korrigierten Totbandeinfluss des Stufenschalters.

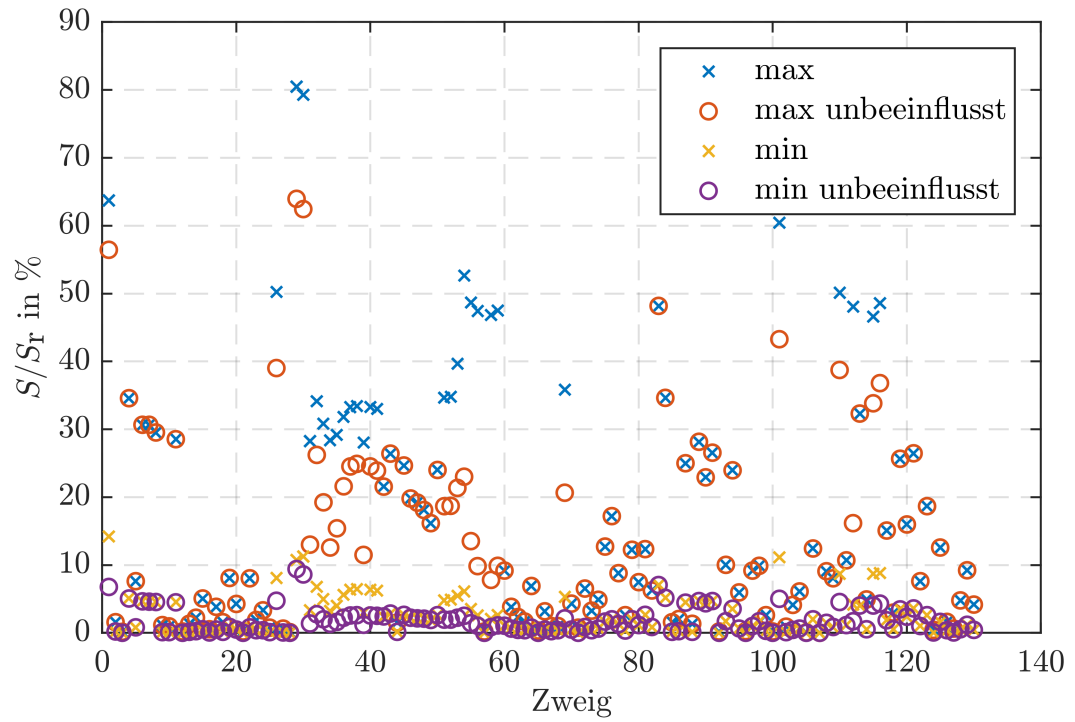


Abbildung A.44: Auslastungsextrema je Zweigelement ohne und mit Blindleistungsabruf.

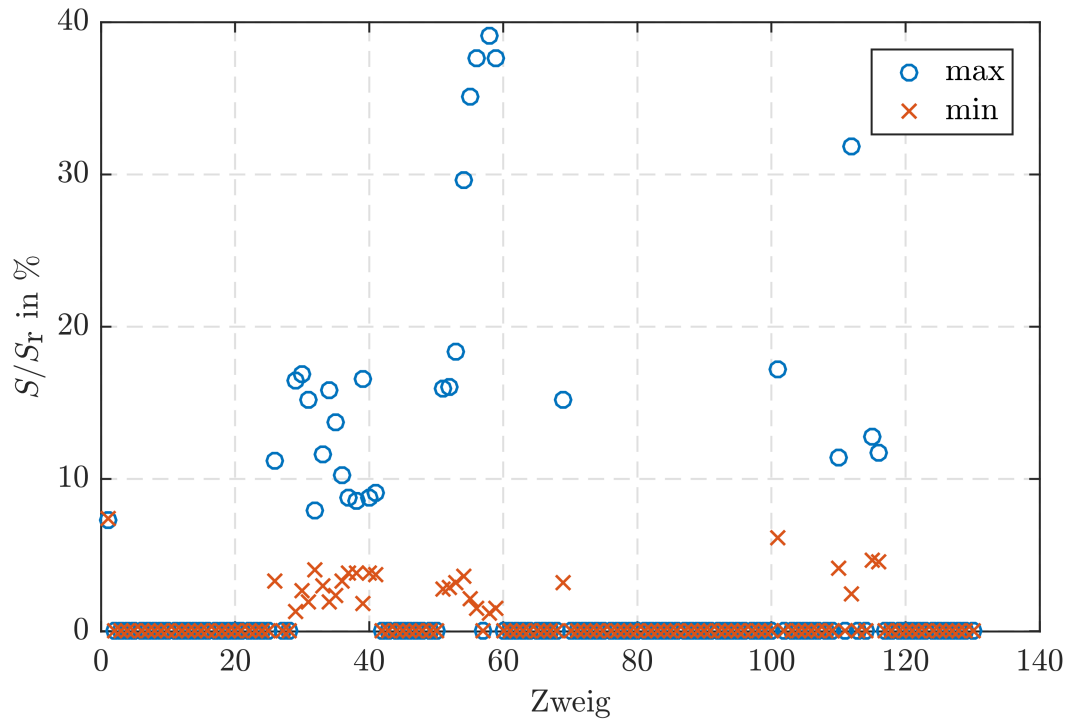


Abbildung A.45: Extrema der Auslastungsänderung je Zweigelement.

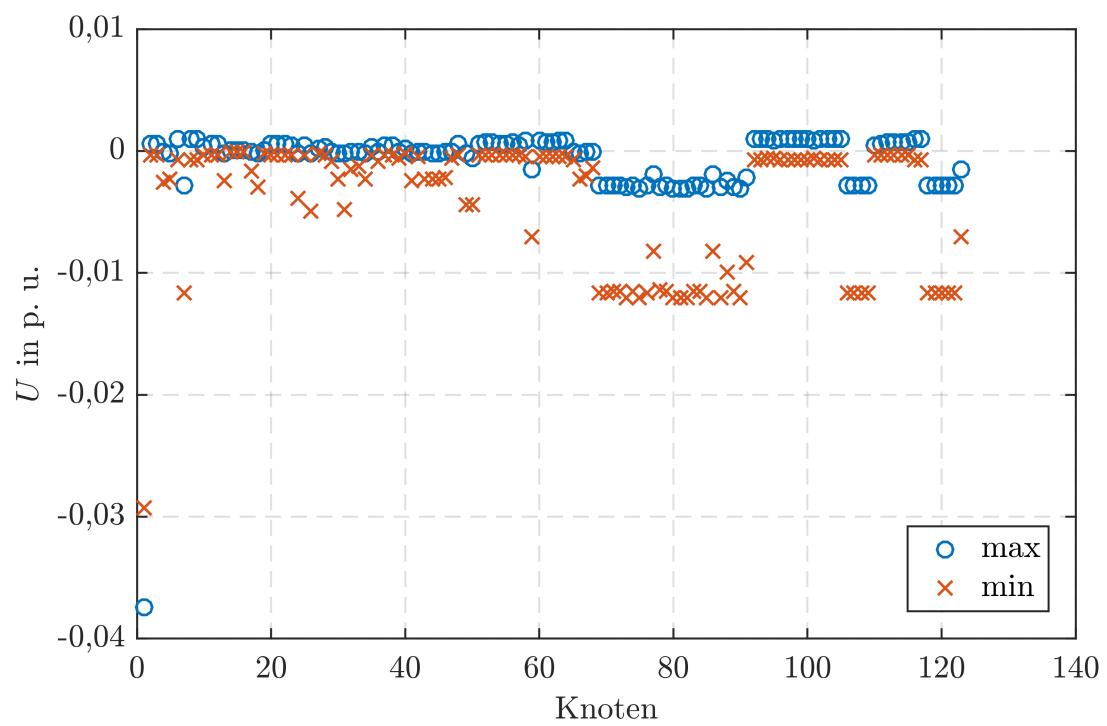


Abbildung A.46: Extrema der Spannungsänderung je Knotenelement mit korrigierten Totbadeinfluss des Stufenschalters.

A.17 Kennzahlen des Beispielnetzes im Szenario S2_1

Im Folgenden werden zu Abschnitt 4.3.4 ergänzte Grafiken dargestellt, die dort sinngemäß erläutert werden.

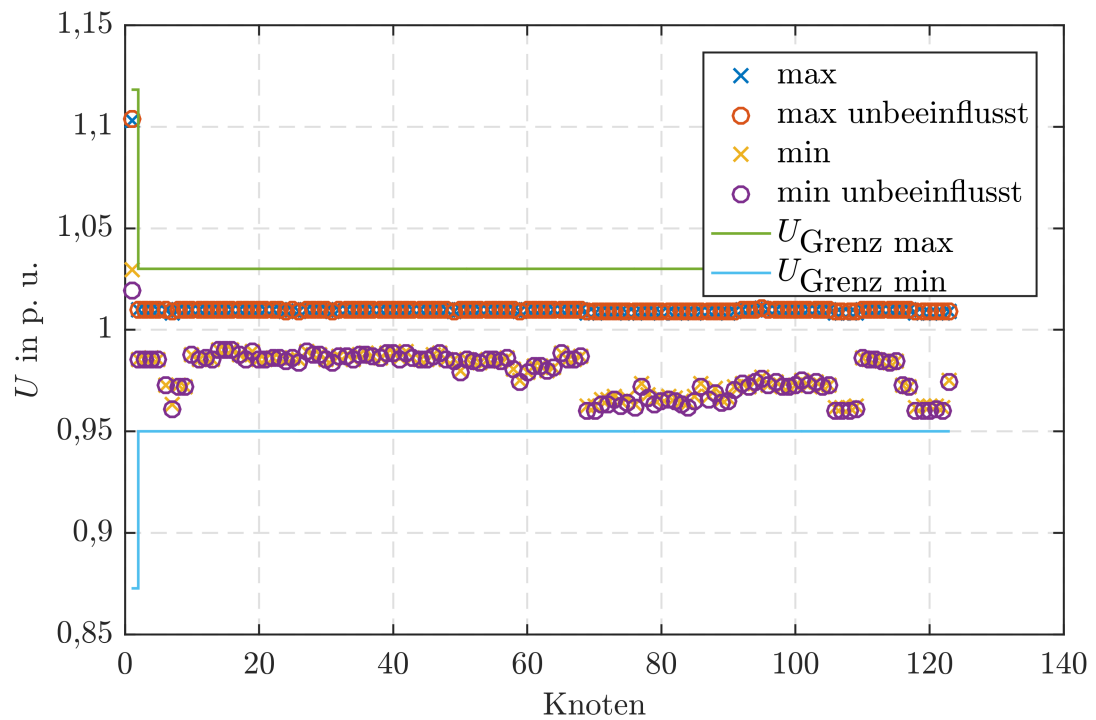


Abbildung A.47: Spannungsextrema je Knotenelement ohne und mit Blindleistungsabruf sowie korrigierten Totbandeinfluss des Stufenschalters.

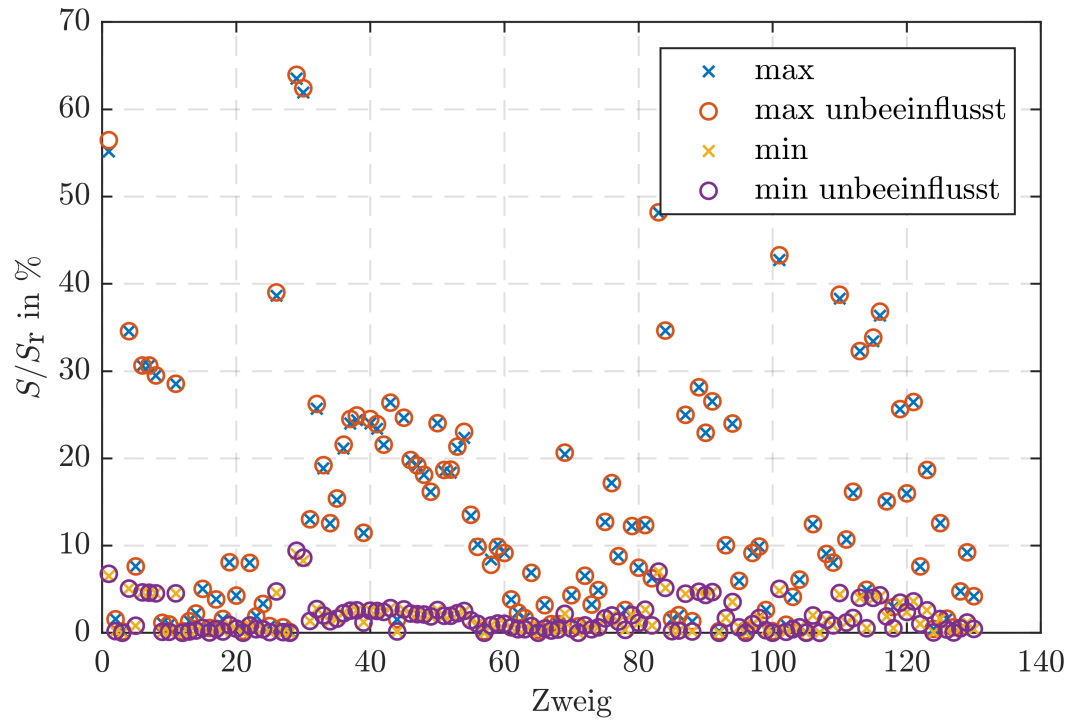


Abbildung A.48: Auslastungsextrema je Zweigelement ohne und mit Blindleistungsabruf.

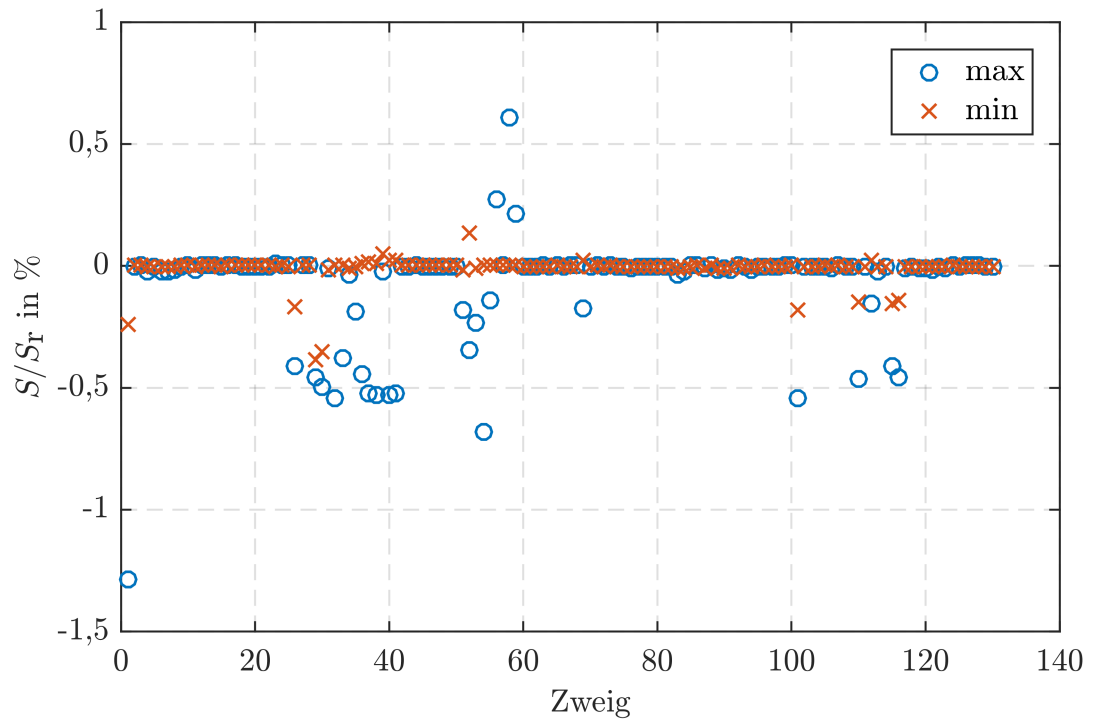


Abbildung A.49: Extrema der Auslastungsänderung je Zweigelement.

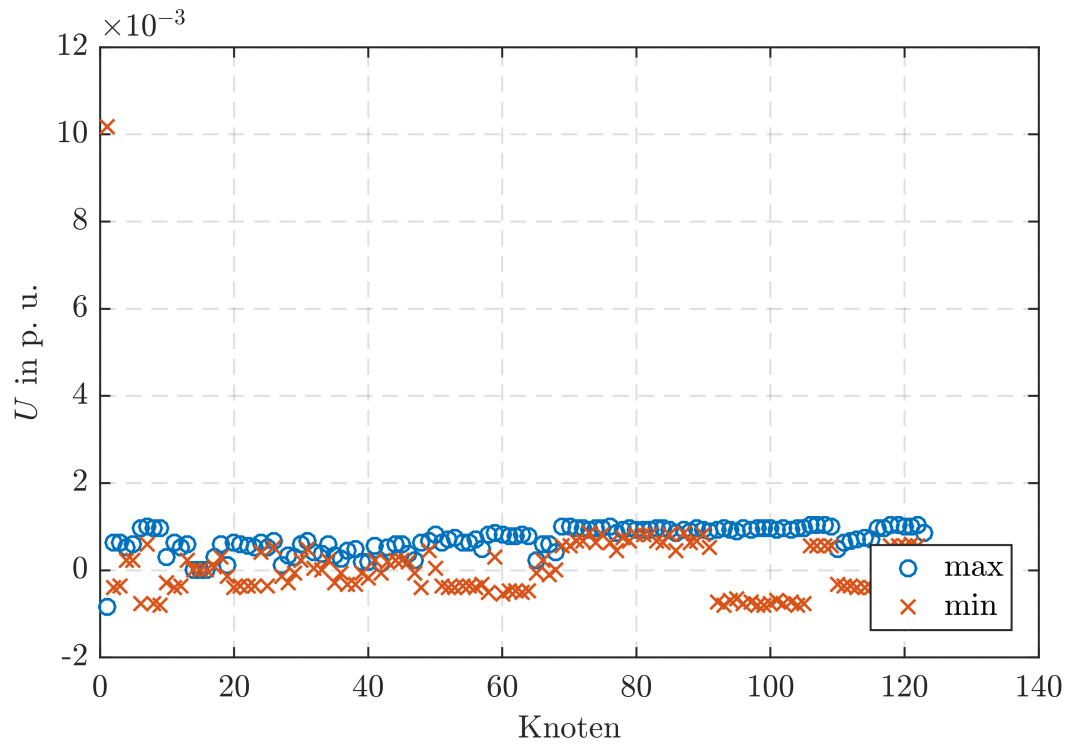


Abbildung A.50: Extrema der Spannungsänderung je Knotenelement mit korrigierten Totbandeinfluss des Stufenschalters.

Literaturverzeichnis

- [1] “Technische Anschlussregel Hochspannung (VDE-AR-N 4120),” VDE, Jan. 2015.
- [2] M. Haslbeck. Forschung Stromnetze: SyNErgie - Systemoptimierendes Netz- und Energiemanagement für die Verteilnetze der Zukunft. 2017-12-13 11:29:54. [Online]. Available: <http://forschung-stromnetze.info/projekte/neues-blindleistungsmanagement-fuer-verteilnetze/>
- [3] “Beitrag industrieller Blindleistungs-Kompensationsanlagen und - Verbraucher für ein innovatives Blindleistungs-Management in der Stromversorgung Deutschlands,” Studie, ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-und Elektronikindustrie e.V. Fachverband Starkstromkondensatoren, 2013.
- [4] Informationsportal Regelbare Ortsnetztransformatoren (RONT) - ront.info. 2018-01-26 13:04:17. [Online]. Available: <http://ront.info/>
- [5] “Blindleistungsmanagement in Verteilnetzen,” FNN-Hinweis, FNN, 2014.
- [6] M. Haslbeck and O. Brückl, “Netzplanungsprozess zur dezentralen Nutzung von Blindleistungsquellen in Verteilungsnetzen,” in Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien 30. und 31. Januar 2018, Berlin, Jan. 2018, pp. 178–193.
- [7] M. Haslbeck, R. Kreuzer, J. Rauch, O. Brückl, A. Günther, R. Bäsman, H. Rietsche, and A. Tempelmeier, “Schlussbericht SyNErgie - Systemoptimierendes Netz- und Energiemanagement für die Verteilungsnetze der Zukunft,” OTH Regensburg, Regensburg, Nov. 2018.
- [8] “Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG),” Teil I, Bundesgesetzblatt 2005, p. 1970, 2005.

- [9] O. Brückl, M. Haslbeck, C. Adelt, J. Eller, F. Habler, T. Sator, T. Sippenauer, B. Stromayer, and J. Stuber, “Zukünftige Bereitstellung von Blindleistung und anderen Maßnahmen für die Netzsicherheit,” Studie, BMWi, 2016.
- [10] M. Lösing and G. Schneider, “Synchronmaschine als Phasenschieber in Biblis A,” Energiewirtschaft - ew, no. 15, pp. 34–42, 2012.
- [11] Sebastian Stock, S. Wildenhues, T. Hennig, T. Henning, and L. Hofmann, “Integration großer Mengen On- und Offshore erzeugter Windenergie in das eltrische Netz durch intelligente Netzanalyse und Clusterbetriebsführung,” in Zukünftige Stromnetze für erneuerbare Energien. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), 2015, pp. 30–33.
- [12] S. Prinz, J. Zeidler, M. Junghans, J.-M. Salzmann, T. Stieger, and M. Hable, “Regelverfahren zur bedarfsgerechten Nutzung der Blindleistungspotenziale,” Elektrizitätswirtschaft - EW, no. 6, pp. 54–59, 2015.
- [13] A. Szabo, J. Goetz, S. Wende- von Berg, M. Braun, T. Stetz, M. Kreutziger, F. Hinz, S. Gehler, and et al., “Beiträge von Flächenverteilnetzen zur Erbringung von Systemdienstleistungen -Technische Anwendungsszenarien,” in Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien: 3. OTTI-Konferenz: Steigenberger Hotel am Kanzleramt, Berlin, 26./27. Januar 2016. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), 2016, pp. 236–247.
- [14] “DIN 40110-1:1994-03 Titel (Deutsch): Wechselstromgrößen; Zweileiter-Stromkreise DIN 40110-2:2002-11 Titel (Deutsch): Wechselstromgrößen - Teil 2: Mehrleiter-Stromkreise.”
- [15] H.-C. Skudelny, Ed., Blindleistung: erweiterte Definitionen, nichtstationäre Betriebszustände, Netzurückwirkungen, Kompensation: Vorträge der ETG-Fachtagung am 1. und 2. Oktober 1979 in Aachen, ser. ETG-Fachberichte. VDE-Verlag, 1980, no. 6.
- [16] M. Depenbrock, “Blind- und Scheinlast in mehrphasig gespeisten Netzwerken,” ETZ-A, vol. 86, no. 24, pp. 778–781, 1965.
- [17] VDE. Spannungshaltung. [Online]. Available: <https://www.vde.com/de/fnn/themen/sicherer-betrieb-dez/spannungshaltung>
- [18] “Technische Richtlinie Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz- Richtlinie für den Anschluss und Parallelbetrieb am Mittelspannungsnetz,” Technische Richtlinie, BDEW, 2008.

- [19] “DIN EN 50160:2011-02, Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen; Deutsche Fassung EN 50160:2010 + Cor. :2010,” DIN, 2011.
- [20] X. Tao, “Automatisierte Grundsatzplanung von Mittelspannungsnetzen,” phdthesis, RWTH Aachen, 2007.
- [21] O. Brückl, “Plädoyer für die wettbewerbliche Bereitstellung von Blindleistung,” Energiewirtschaft-ew, no. 1/2018, pp. 46–48, 2018.
- [22] “NAV - Verordnung über Allgemeine Bedingungen für den Netzanschluss und dessen Nutzung für die Elektrizitätsversorgung in Niederspannung,” Verordnung, 2006.
- [23] Stromnetz - Allgemeine Bedingungen - Netzanschluss und Netznutzung im Netzgebiet von MITNETZ STROM | MITNETZ STROM. 2018-03-10 10:47:53. [Online]. Available: <https://www.mitnetz-strom.de/netzanschluss/allgemeine-bedingungen>
- [24] “Verordnung zu Systemdienstleistungen durch Windenergieanlagen (Systemdienstleistungsverordnung - SDLWindV),” Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2009. [Online]. Available: <http://www.gesetze-im-internet.de/sdlwindv/>
- [25] “Technische Anschlussregeln Mittelspannung (E VDE-AR-N 4110),” Entwurf Technische Anschlussregel, VDE, 2017.
- [26] “VDE-AR-N 4105 Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz- Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz,” Technische Richtlinie, VDE, 2013.
- [27] M. Malsch, S. Prinz, J. Zeidler, W. Becker, and R. Halbauer, “Blindleistungsbereitstellung durch EEG-Anlagen: Potenziale und Grenzen im Hinblick auf die Netzbetriebsführung in den Verteilungsnetzen,” in ETG-Fachbericht-Internationaler ETG-Kongress 2013, Energieversorgung auf dem Weg nach 2050. VDE VERLAG GmbH, 2013.
- [28] Main-Donau Netzgesellschaft, “Ergänzung zur Technischen Richtlinie Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz (BDEW),” Jan. 2015.
- [29] “Transmission Code 2007, Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber,” Technische Richtlinie, VDN, 2007.

- [30] BDEW, “Technische Anschlussbedingungen TAB 2007 für den Anschluss an das Niederspannungsnetz,” Aug. 2007.
- [31] —, “Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an das Mittelspannungsnetz TAB Mittelspannung 2008,” May 2008.
- [32] “Technische Richtlinie für den Betrieb von Netzanschlüssen am Hoch- bzw. Mittelspannungsnetz,” Jun. 2017. [Online]. Available: https://www.bayernwerk-netz.de/content/dam/revu-global/bayernwerk-netz/files/netz/netzanschluss/20170701_Anlage_2_Technische_Betriebsrichtlinie.pdf
- [33] entso-e, “Netzkodex mit Netzanschlussbestimmungen für Stromerzeuger (RFG),” 2018-01-02 11:11:27. [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32016R0631&from=EN>
- [34] “VERORDNUNG (EU) 2016/1388 DER KOMMISSION vom 17. august 2016 zur festlegung eines netzkodex für den lastanschluss,” Verordnung, entso-e, 2016.
- [35] “Final Draft Network Code on Demand Connection (DCC),” ENTSO-E, Dec. 2012.
- [36] BNetzA, “BNetzA-Beschluss Az: BK6-13-047,” Mar. 2016, 2018-01-02 12:56:58. [Online]. Available: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Service-Funktionen/Beschlusskammern/1BK-Geschaeftszeichen-Datenbank/BK6-GZ/2013/2013_0001bis0999/2013_001bis099/BK6-13-047/BK6-13-047_Beschluss_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- [37] M. Kummer and R. Fuchs, “Spannungshaltung im Übertragungsnetz unter dem Einfluss hoher dezentraler Energieerzeugung,” in ETG-Fachbericht-Internationaler ETG-Kongress 2013, Energieversorgung auf dem Weg nach 2050. VDE VERLAG GmbH, 2013.
- [38] O. Brückl, “Endbericht zum Gutachten Blindleistungsmanagement in den Stromnetzen Österreichs,” Institut für Netz- und Anwendungstechnik GmbH, Nov. 2017, uneröffentlicht.
- [39] INA Institut für Netz- und Anwendungstechnik GmbH and Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, “Entwicklung einer Verfahrensweise zur quantitativen Bewertung verschiedener Blindleistungsbereitstellungsoptionen,” Dec. 2017.

- [40] O. Brückl, M. Haslbeck, O. Portner, and G. Hinz, “Kostenminimaler Netzanschluss einer 8-MW-PV-Anlage mithilfe regelbarer Ortsnetztransformatoren,” Energiewirtschaftliche Tagesfragen - et, no. 6, pp. 63–65, 2014.
- [41] J. Schmiesing, “Regelbare Ortsnetztransformatoren zur Integration regenerativer Erzeugungsanlagen in ländlichen Mittelspannungsnetzen,” phdthesis, Technische Universität Clausthal, 2016.
- [42] Energie-Forschungszentrum Niedersachsen, Ed., Netzausbauvarianten in Niederspannungsverteilnetzen: regelbare Ortsnetztransformatoren in Konkurrenz zu konventionellen Netzausbaumaßnahmen ; eine technische und wirtschaftliche Betrachtung, 1st ed., ser. Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen. Cuvillier, 2014, no. 20.
- [43] B. Werther, A. Becker, E.-A. Wehrmann, J. Zum Hingst, and H.-P. Beck, Eds., Orientierungsstudie - regelbare Ortsnetztransformatoren, 1st ed., ser. Schriftenreihe des Energieforschungszentrums Niedersachsen. Cuvillier, 2012, no. 6.
- [44] G. Kerber, “Aufnahmefähigkeit von Niederspannungsverteilnetzen für die Einspeisung aus Photovoltaikkleinanlagen,” phdthesis, Technische Universität München, 2011.
- [45] D. Schacht, S. Patzack, H. Vennegeerts, C. Bock, and S. Schmidt, “Stabilitätsbewertung einer Q(U)-Regelung für Erzeugungsanlagen,” Energiewirtschaft - ew, no. 6, pp. 68–71, 2015.
- [46] G. Kerber, “Umrichter und Steuerverfahren für einen Umrichter,” europe Patent EP1 906 505A1, 2008.
- [47] N. Rotering, “Zielnetzplanung von Mittelspannungsnetzen unter Berücksichtigung von dezentralen Einspeisungen und steuerbaren Lasten,” phdthesis, RWTH Aachen, 2013.
- [48] “Statische Spannungshaltung,” Studie, FNN, 2014.
- [49] O. Brückl, N. Dalisson, B. Strohmayer, and M. Haslbeck, “Spannungshaltungsmaßnahmen im Verteilungsnetz,” Energiewirtschaft - ew, no. 6, pp. 66–69, 2014.
- [50] “Systemdienstleistungen 2030 - Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien.” Studie, dena, 2014.

- [51] W. Becker and R. Halbauer, “Neue Rolle der Verteilnetze - Anwendungsfall Blindleistungsmanagement,” in Kraftwerkstechnik: sichere und nachhaltige Energieversorgung - Band 5 ; [Beiträge des 45. Kraftwerkstechnischen Kolloquiums, 15. und 16. Oktober 2013 in Dresden]. TK Verl., Thomé-Kozmiensky, 2013, p. 1029.
- [52] H. Emanuel, “Blindleistungsbereitstellung durch Windenergieanlagen,” in Zukünftige Stromnetze für erneuerbare Energien, O. Technologie-Transfer-Institut, Ed. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), 2015, pp. 120–125.
- [53] M. Haslbeck and O. Brückl, “Liberalisierung von Systemdienstleistungen,” in Zukünftige Stromnetze für erneuerbare Energien. OTTI, 2014, pp. 170–175.
- [54] “DIN EN 60038:2012-04; VDE 0175-1:2012-04, CENELEC-Normspannungen (IEC 60038:2009, modifiziert); Deutsche Fassung EN 60038:2011,” DIN, 2012.
- [55] Informationsportal Spannungshaltung - Spannungshaltung.de. 2018-01-26 13:05:14. [Online]. Available: <http://spannungshaltung.de/>
- [56] “DIN IEC 60076-7:2008-02, Leistungstransformatoren - Teil 7: Leitfaden für die Belastung von ölgefüllten Leistungstransformatoren.”
- [57] M. Meuser, “Verbesserte Ausnutzung bestehender Netzstrukturen zur Integration elektrischer Erzeugungsanlagen,” phdthesis, RWTH Aachen, 2012.
- [58] W. Schufft and A. Gröhlich, “Charakteristik eingespeister Photovoltaik- und Windleistung,” Elektrizitätswirtschaft - ew, vol. 4/2014, pp. 82–85, 2014.
- [59] R. Pardatscher, R. Witzmann, G. Wirth, G. Becker, M. Garhamer, and J. Brantl, “Untersuchung zu den Auswirkungen von Photovoltaikeinspeisung auf das Nieder-und Mittelspannungsnetz,” in ETG-Fachbericht-Internationaler ETG-Kongress 2011. VDE VERLAG GmbH, 2011.
- [60] Technische Universität Cottbus / Lehrstuhl Energiewirtschaft and Meier, Hermann, Repräsentative VDEW-Lastprofile. VDEW, 1999.
- [61] M. Wolter, “Reactive Power Profiles,” in Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Power Systems (Power’08), Santander, Spain, vol. 23, 2008.

- [62] A. Berling, M. Haslbeck, and O. Brückl, “Interpretation und Relevanz verschiedener Blindleistungsarten für die Modellierung von Niederspannungsnetzen in der Netzplanung,” in Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien 30. und 31. Januar 2018, Berlin, Jan. 2018, pp. 467–474.
- [63] R. Kreuzer, M. Haslbeck, and O. Brückl, “Modellierung von Mittelspannungsnetzen zur verbesserten Nachbildung von Wirk- und Blindleistungsflüssen,” in Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien 30. und 31. Januar 2018, Berlin, Jan. 2018, pp. 504–509.
- [64] W. Just and W. Hofmann, Blindstromkompensation in der Betriebspraxis: Ausführung, Energieeinsparung, Oberschwingungen, Spannungsqualität. Berlin: VDE-Verl, 2003.
- [65] M. Haslbeck, B. Vogl, and O. Brückl, “Interpretation von P-Q-Wolken als Hilfsmittel zur Bewertung von Mittelspannungsnetzen,” in 4. OTTI-Konferenz: Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien, Berlin, Jan. 2017.
- [66] M. Kraiczy, H. Wang, S. Schmidt, F. Wirtz, J.-C. Töbermann, and M. Braun, “Gesicherte und dargebotsabhängige Blindleistungsbereitstellung durch Erzeugungsanlagen im Verteilnetz,” in Zukünftige Stromnetze für erneuerbare Energien, 2017, konferenzband unveröffentlicht.
- [67] Haonan Wang, Markus Kraicy, Sebastian Schmidt, Benjamin Requardt, Christian Töbermann, and Martin Braun, “Blindleistungsmanagement im Verteilnetz durch zentrale Regelung großer PV-Anlagen: Pilottest in einem Mittelspannungsnetz der Bayernwerk AG,” in Zukünftige Stromnetze für erneuerbare Energien, 2017, konferenzband unveröffentlicht.
- [68] J. Rauch, M. Klitsman, M. Haslbeck, and O. Brückl, “Entwicklung von Methoden zur Prognose der Blindleistungsbilanz von Mittelspannungsnetzen zur Steuerung eines dezentralen Blindleistungsabrufs,” in Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien 30. und 31. Januar 2018, Berlin, Jan. 2018, pp. 524–535.
- [69] “DIN EN 60694 VDE 0670-1000:2002-09, Gemeinsame Bestimmungen für Hochspannungs-Schaltgeräte-Normen,” 2002.
- [70] J. Zhu, Optimization of power system operation, ser. IEEE Press series on power engineering. Wiley-IEEE ; John Wiley [distributor], 2009.

- [71] C. Oerter, “Autarke, koordinierte Spannungs- und Leistungsregelung in Niederspannungsnetzen,” Ph.D. dissertation, Universitätsbibliothek Wuppertal, Wuppertal, 2014.